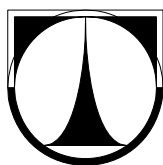


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2009

Jakub Tym

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektronické informační a řídicí systémy

Budič piezoelektrického motoru

Drive of piezoelectric motor

Bakalářská práce

Autor: **Jakub Tymł**

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jan Václavík

V Liberci 26. 5. 2009

(originál zadání)

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 26. května 2009

Podpis:

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří se zasloužili o vznik mé bakalářské práce a předali mi své bohaté znalosti a zkušenosti.

Jmenovitě bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Rydlovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Janu Václavíkovi za obětavou odbornou pomoc v praktické části práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá realizací dvou přípravků a odzkoušením jejich funkčnosti. Jedním z těchto přípravků je DC/DC měnič z 12 V na 140 V pracující v režimu Flyback. Druhým zařízením je univerzální výkonový člen, který je proveden přes čtyři nezávislé půlmůstky. Tento budič bude používat PWM sinusovou modulaci.

V práci jsou nejprve popsány dílčí části potřebné pro realizaci přípravků. Druhá část je zaměřena na oživení a odzkoušení výrobků.

Klíčová slova: transformátor, piezoelektrický jev, budič, PWM.

Abstract

Bachelor thesis is engaged in implementation of two preparations and examining of their functionality. One of them is DC/DC from 12V to 140V converter, working in Flyback mode. The other appliance is an universal power item, which is carried out by four independent half bridges. This exciter is based on PWM sine modulation.

Partial components are described in this thesis at first, the other part is focused on activate and examining of products.

Key words: transformer, piezoelectric effect, exciter, PWM.

Obsah

Seznam symbolů, zkratk a termínů	10
Úvod.....	12
1 DPS	13
1.1 Definice.....	13
1.2 Historie.....	13
1.3 Materiál.....	13
1.4 Odstranění mědi z DPS.....	15
1.4.1 Leptání	15
1.4.2 Fotocesta	15
2 Transformátor	16
2.1 Definice.....	16
2.2 Popis.....	16
2.3 Princip.....	16
2.4 Náhradní schéma transformátoru.....	17
2.5 Transformátor v chodu naprázdno	18
2.6 Transformátor v chodu nakrátko.....	18
3 Spínané zdroje.....	19
3.1 Rozdíly mezi spínanými a lineárními zdroji.....	19
3.2 Jednočinný měnič	19
3.2.1 Popis činnosti.....	20
3.3 Dvojčinný měnič (půlmůstek)	21
3.3.1 Popis činnosti.....	21
3.3.2 Výhody zapojení	22
3.3.3 Nevýhody zapojení	22
4 Piezoelementy	23
4.1 Historie.....	23
4.2 Základní rozdělení piezoelektrického jevu a jeho princip	23
4.3 Podmínky piezoelektrického jevu.....	23
4.4 Hlavní oblasti použití piezoelementů	24
4.5 Funkční módy	24
4.5.1 Parametry charakterizující práci ve statickém režimu	24
4.5.2 Parametry charakterizující práci v rezonančním režimu	24

4.6	Fyzikální podstata piezoelektrického jevu.....	24
4.7	Základní piezoelektrické jevy	25
4.8	Materiály pro piezoelektriku a jejich příklady	26
4.8.1	Krystalické piezoelektrické látky (monokrystaly).....	26
4.8.2	Polokrystalické keramické materiály (piezoelektrická keramika).....	26
4.8.3	Organické polymery (piezoelektrické polymery)	26
5	Piezomotory	27
5.1	Rozdělení piezomotorů dle funkčního principu podle Sadayuki Ueha	27
5.2	Způsoby buzení.....	27
5.2.1	Buzení postupnou (podélnou) elastickou vlnou.....	27
5.2.2	Buzení číslicovou vlnou.....	30
5.2.3	Buzení pulsně šířkovou modulací (PWM).....	34
5.3	Zapojení výkonových budičů.....	36
5.4	Výhody piezoelektrických motorů.....	38
5.5	Nevýhody piezoelektrických rotačních motorů	38
6	Měření na transformátoru	39
6.1	Měření fázových posuvů.....	40
6.2	Rozptylová indukčnost	41
6.3	Návrh vzduchové mezery	44
7	Měření na výkonovém spínaném zdroji.....	47
7.1	Popis činnosti.....	47
7.2	Oživení obvodu.....	48
7.3	Návrh RC článku	49
8	Měření na budiči	50
8.1	Dead time	50
8.2	Měření náběžných a sestupných hran	51
8.3	Měření fázových posuvů.....	55
	Závěr	58
	Literatura.....	59

Seznam symbolů, zkratek a termínů

Symbol	Jednotka	Popis
D		dioda
DC/DC		měníč kmitočtu ze sej průběhu na střídavý
DPS		deska plošného spoje
$FPGA$		programovatelný logický obvod
HIN		HI_IN vývod
k		konstanta
$L1$		vinutí 1
LIN		LOW_IN vývod
PWM		pulsně šířková modulace
S_I, S_{IN}		spínače
TI		tranzistor
XI, XIN		signály
B	[T]	elektromagnetické indukce
C	[F]	kondenzátor
e	[J.m ⁻³]	nakumulovaná energie
E_{ACC}	[J]	akumulovaná energie
F	[N]	síla
f_{OSC}	[Hz]	frekvence oscilátoru
f_R	[Hz]	rezonanční frekvence motoru
f_{SW}	[Hz]	pracovní frekvence
H	[A.m ⁻¹]	intenzita magnetického pole
I_2'	[A]	proud sekundárním vinutím
I_{Fe}	[A]	proud protékající rezistorem R_{Fe}
I_P, I_I	[A]	proud procházející primárním vinutím
I_μ	[A]	proud protékající hlavní indukčností
L	[H]	indukčnost
N	[-]	počet závitů
p	[-]	převod transformátoru
P_{IN}	[W]	přenášený výkon
$P_{VZORKŮ}$	[-]	počet vzorků

Symbol	Jednotka	Popis
Q	[-]	jakost vinutí
Q	[C]	náboj
R_l	[Ω]	reálný odpor primárního vinutí
R_2'	[Ω]	reálný odpor sek. vinutí přepočítaný na primární vinutí
R_{Fe}	[Ω]	reálný odpor náhradního obvodu
$R_{ZKR.L1}$	[Ω]	odpor zkratovaného vinutí L1
$RMS1$	[V]	napětí na vstupním vinutí transformátoru
$RMS2$	[V]	napětí na sekundárním vinutí transformátoru
S	[m ²]	plocha sloupku feritového jádra transformátoru
t	[s]	čas
t	[°C]	teplota
T	[s]	perioda
t_{nh}	[s]	doba náběžné hrany
t_{sh}	[s]	doba sestupné hrany
$t_{SEPNUTÍ}$	[s]	doba sepnutí
T_{ON}	[s]	dobu sepnutí
U_{ef}	[V]	efektivní hodnota napětí
u_i	[V]	indukované napětí
U_M	[V]	amplitudové napětí
U_{pp}	[V]	zdroj napětí (špička-špička)
V_P	[V]	napájecí napětí primárního vinutí
V_{VZ}	[m ³]	objem vzduchové mezery
$X_{l\sigma}$	[H]	rozptylová reaktance primárního vinutí
$X_{2\sigma}'$	[H]	rozptylový reaktance sekundárního vinutí
X_h	[H]	hlavní reaktance transformátoru
Z_l	[Ω]	impedance primárního vinutí
Z_2	[Ω]	impedance sekundárního vinutí
φ	[°]	fázový posuv
Φ	[Wb]	magnetický indukční tok
λ	[m]	vlnová délka
ω	[s ⁻¹]	úhlová frekvence
μ_0	[Hm ⁻¹]	permeabilita vakua
μ_r	[-]	relativní permeabilita

Úvod

Tato bakalářská práce pojednává o realizaci návrhu dvou zařízení. Zdroje DC/DC a budiče, který je učen pro buzení piezoelektrických motorků a jiných aktuátorů. Tato zařízení byla navržena Ing. Janem Václavíkem a je třeba je fyzicky realizovat, oživit a provést potřebná měření.

Zdroj bude pracovat v režimu Flyback. Pro zhotovení zdroje je nutná stavba transformátoru s předem zadanými hodnotami. Na vstupní svorky transformátoru by se mělo přivádět napětí 12 V a na výstupních svorkách by mělo být měřitelné napětí $\pm 80\text{ V}$ na každém hlavním sekundárním vinutí (L2, L3). Protože jsou hlavní primární vinutí totožná, všechny hodnoty by měly vycházet srovnatelné. Požadavky na indukčnost v primárním vinutí a pomocném sekundárním vinutí jsou řádově μH . Hlavní sekundární vinutí by měla mít hodnotu v řádech mH. Odpory vinutí hlavních sekundárních vinutí by měly vycházet v jednotkách Ohmů.

Druhé zařízení je v podstatě složeno z programovatelného hradlového pole značky Lattice, oscilátoru generujícího pulsy a čtyř na sobě nezávislých pálmůstků s výkonovými tranzistory. Tento obvod bude díky oscilátoru generovat hodinové pulzy a naprogramované hradlové pole je bude posouvat o $\pi/2$. Protože je tento přípravek navrhován jako univerzální, lze hradlové pole přeprogramovat, aby generovalo fázové posuvy o jiných délkách.

Na budiči budou změřeny doby náběžné a sestupné hrany signálu při různých frekvencích. Dále pak budou změřena fázová posunutí.

1 DPS

1.1 Definice

Deska plošných spojů se v elektronice používá pro mechanické připevnění a současně pro elektrické propojení elektronických součástek. Součástky jsou propojeny vodivými cestami z mědi.

1.2 Historie

Začátkem čtyřicátých let byl realizován americký patent na odleptávání plošných spojů. Protože byla technologie na výrobu příliš drahá, upustilo se od ní. Desky s plošnými spoji začaly být masivněji prodávány s vývojem nových materiálů a výrobních postupů. Nejprve byla měděná fólie lepena na tvrzený papír, sklotextil, popř. pertinax. Později se začíná přecházet na sklolamináty se zalaminovanou měděnou fólií, která musí mít velmi vysokou kvalitu mědi, ta se pohybuje 99,5 % (elektrolytická měď). Dnes se vyrábí značné množství rozdílných podkladových materiálů, které se liší převážně tím, kde jsou DPS používány. Významnou roli hraje kapacitní vodivost podložky u kmitočtově závislých obvodů. Např. pro velmi vysoké kmitočty řádu GHz se používají teflonové lamináty (duroid) s příměsemi dále zvyšujícími jakost podložky.

U nás se první pokusy realizovat plošný spoj objevily v roce 1957. Ale až na počátku šedesátých let se rozjela hromadnější výroba. Jako podklad se používala pertinaxová podložka s lepenou fólií - cuprexcard. Tu ovšem brzy předčil epoxidový laminát tzv. cuprextit, který se výrazně používá i v dnešní době. Na cuprextitu je naplátována (nanesena) tenká vrstvička mědi, kterou je možné ještě doplnit o fotocitlivou vrstvu. Tloušťka cuprextitu je běžně 1,5 mm, tloušťka mědi 35 μm při standardním plátování.

1.3 Materiál

„Materiály používané na výrobu DPS se mohou lišit. Při osazování DPS by měl být brán zřetel na jejich hlavní vlastnosti, např. čistota mědi, teplotní závislost, možnost prokovení otvorů atd. Za nejpoužívanější materiály jsou považovány materiál FR4 a CEM1, které jsou popsány níže.

- **Materiál kategorie FR4**

Nosným materiálem je několik vrstev skelné rohože spojené epoxidovou pryskyřicí plátované elektrolyticky vyloučenou mědí o čistotě 99,8 %. Je vhodný pro obrysové frézování, mechanicky odolný, má vysokou ohybovou pevnost, rozměrovou stabilitu, tepelnou odolnost do 130 °C, lze aplikovat HAL, je určen pro prokovení otvorů. Je vhodný na nejnáročnější aplikace DPS.

- **Materiál kategorie CEM1**

Nosný materiál je konstruován kombinací celulózového papíru spojeného epoxidovou pryskyřicí, na které je plátována elektrolyticky vyloučená měď o čistotě 99,8 %. Má zvýšenou mechanickou odolnost, rozměrovou stabilitu, odolnost proti tepelnému rázu při pájení a zvýšenou odolnost vůči klimatickým podmínkám. Materiál není vhodný na prokovení otvorů, lze aplikovat HAL.“ [1]

Další často používané materiály jsou stručně popsány v tabulce tab.1.1.

Tab. 1.1: Tabulka materiálů na výrobu DPS [1]

Označení	Složení materiálu	Teplota tečení [°C]	Poznámka
FR2	Fenolpapír	-	pro levnější konstrukce, vhodné pro formát ražení
FR3	Fenoplast	-	dobré střížné vlastnosti
CEM1	Sklotextil	130	vhodné pro dělení DPS drážkováním
FR4	Sklotextil	130	běžné konstrukce zařízení
FR5	Sklotextil	160	lepší tepelné a chemické vlastnosti
G4	Polyamid- sklotextil	260	pro tepelně namáhané konstrukce

HAL (Hot Air Levelling)

„Žárové cinování - halování je technologický proces finální úpravy DPS nanesením 63 % SnPb pájky na povrch vodičů a pájecích oček pro uchování pájitelnosti.“ [2]

1.4 Odstranění mědi z DPS

Přebytečná měď z desky plochých spojů musí být odstraněna, aby vznikly vodivé cesty, které propojují elektronické součástky. Toto odstranění může být prováděno dvěma základními způsoby:

- leptáním
- fotocestou

1.4.1 Leptání

Dále se dělí na:

- mokré (chemické) leptání
- suché (plazmatické) leptání – v praxi se téměř nepoužívá

1.4.2 Fotocesta

Návrh plošného spoje se natiskne na pausovací papír nebo folii. Ten se položí na cuprexit s fotocitlivou vrstvou a osvětlí se zářivkou, výbojkou nebo jiným ultrafialovým zářením ze vzdálenosti okolo 50 cm. Doba osvětlení je závislá především na příkonu zářivky. Osvícená deska se vloží do roztoku hydroxidu solného (NaOH), osvícenou stranou nahoru, na tak dlouhou dobu, dokud jsou na osvětlených místech stopy fotorezistu. Nakonec se deska položí do leptací lázně chloridu železitého (FeCl_3).

2 Transformátor

2.1 Definice

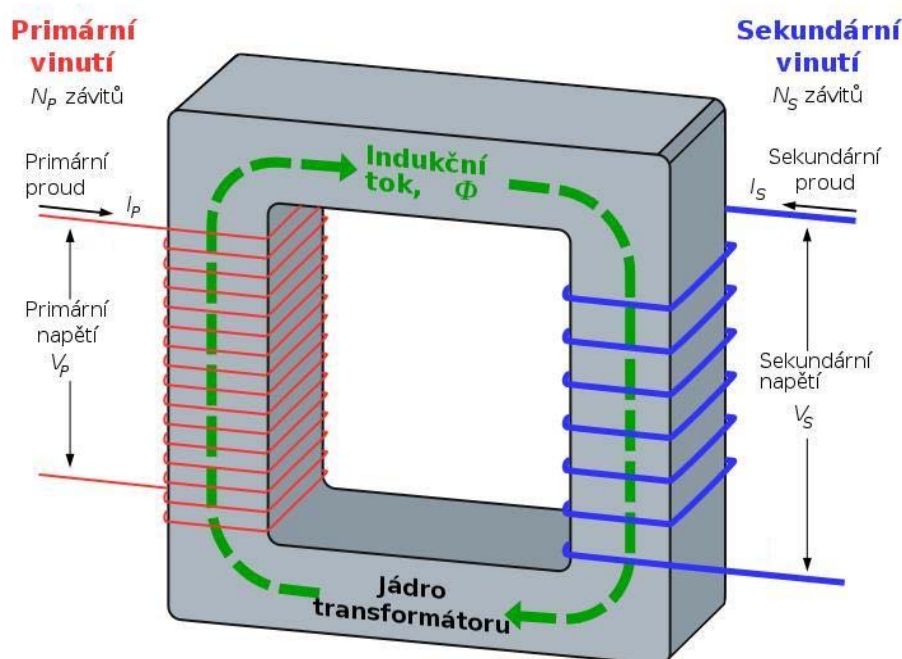
Transformátor je elektrický netočivý stroj, který umožňuje přenášet elektrickou energii z jednoho obvodu do jiného pomocí vzájemné elektromagnetické indukce.

2.2 Popis

Transformátor je v podstatě složen z cívek. Jedna cívku je chápána jako jedno vinutí. Transformátor má minimálně dvě cívky - primární a sekundární, přičemž sekundárních cívek (vinutí) může být více. Tyto cívky jsou navinuty na společném železném jádře.

2.3 Princip

Transformátor pracuje na principu elektromagnetické indukce B . Je-li připojeno na primární cívku střídavé napájecí napětí V_P , začne cívkou protékat proud I_P . Kolem cívky se vytváří magnetické pole, které vyvolá magnetický tok Φ v jádře transformátoru. Z primární cívky pronikají do sekundární cívky magnetické siločáry a indukují v ní napětí U_S . Toto napětí je pak napětí sekundárního vinutí (obr. 2.1).

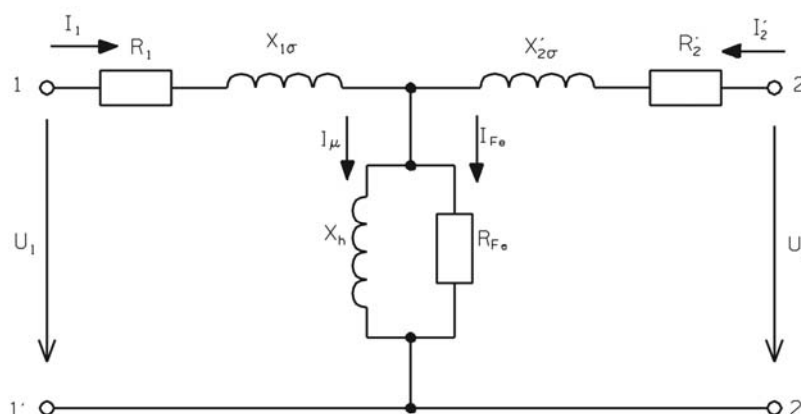


Obr. 2.1: Princip transformátoru [7]

2.4 Náhradní schéma transformátoru

Náhradní schéma transformátoru je navrženo tak, aby co možná s největší přesností nahrazovalo skutečný transformátor a bylo možné na něm demonstrovat jevy, které zde vznikají za chodu transformátoru, tj. při průchodu proudy.

Toto schéma (obr. 2.2) je možné chápat jako sériové zapojení dvou rezistorů a cívek. Mezi ně je vloženo paralelní zapojení rezistoru a cívky. Rezistor R_1 a cívka $X_{1\sigma}$ mohou být chápány jako reálné hodnoty primárního vinutí transformátoru, rezistor R_2' a cívka $X_{2\sigma}'$ jako reálné hodnoty sekundárního vinutí přepočítané na primární vinutí přes převod transformátoru. Rezistor R_{Fe} tvoří s cívkou X_h tzv. rozptylovou indukčnost. Při průchodu proudy I_{Fe} vznikají na rezistoru R_{Fe} takové ztráty, které odpovídají ztrátám v železe u skutečného transformátoru. Cívka X_h tvoří hlavní reaktanci transformátoru a proto vyvolává magnetický tok Φ_h . To je ovšem podmíněno průchodem proudy I_μ .

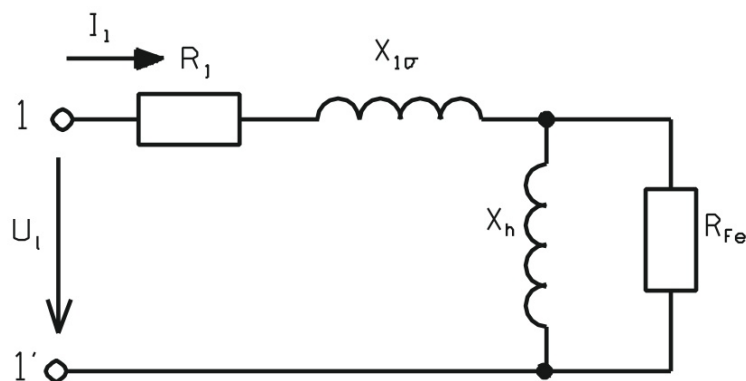


Obr. 2.2: Náhradní schéma transformátoru

R_1	reálný odpor primárního vinutí
$X_{1\sigma}$	rozptylová reaktance primárního vinutí
R_2'	reálný odpor sekundárního vinutí přepočítaný na primární vinutí
$X_{2\sigma}'$	rozptylová reaktance sekundárního vinutí
R_{Fe}	reálný odpor náhradního obvodu
X_h	hlavní reaktance transformátoru vyvolávající magnetický tok Φ_h
I_1	proud primárním vinutím
I_2'	proud sekundárním vinutím
I_μ	proud protékající hlavní indukčností
I_{Fe}	proud protékající rezistorem R_{Fe}

2.5 Transformátor v chodu naprázdno

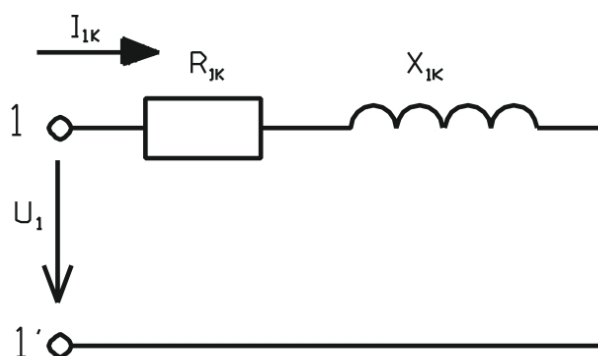
Pracuje-li transformátor v chodu naprázdno, znamená to, že mezi svorkami 2 a 2' na obr. 2.2 není připojena žádná zátěž. Je tedy zřejmé, že celou větví s prvky R_2' a $X_{2\sigma}'$ neprotéká žádný proud a není tedy potřeba tuto větev dále uvažovat. Z toho důvodu je možno náhradní schéma překreslit jako obr. 2.3.



Obr. 2.3: Náhradní schéma transformátoru v chodu naprázdno

2.6 Transformátor v chodu nakrátko

Tento režim opět vychází z obr. 2.2. Je-li připojen tento obvod ke zdroji napájecího napětí a svorky 2 a 2' jsou zkratovány, rozptylová indukčnost X_h a R_{Fe} tvoří velký odpor pro procházející proud. Z toho důvodu proud protéká pouze přes prvky R_1 , $X_{1\sigma}$, R_2' , $X_{2\sigma}'$. Díky tomu, že tyto polovodičové prvky jsou zapojeny do série, je možné je sečíst. Tím vznikne výsledný zjednodušený náhradní obvod transformátoru v chodu nakrátko (obr. 2.4).



Obr. 2.4: Výsledné náhradní schéma transformátoru naprázdno

3 Spínané zdroje

Spínaný zdroj, který je předmětem této bakalářské práce, pracuje ve spínacím režimu Flyback. Tento režim patří do skupiny jednocestných měničů.

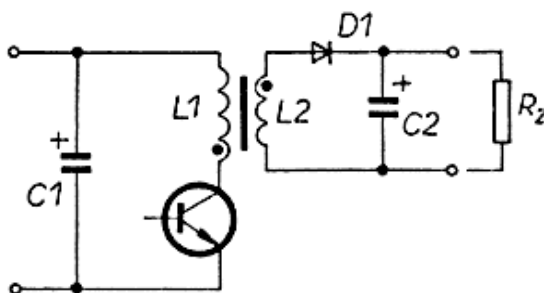
„Naprostá většina napájecích zdrojů používaných ve výpočetní technice je dnes řešena jako spínané zdroje. Použití spínaných zdrojů umožňuje zlepšit účinnost napájecí části a snížit výrobní náklady. Další úspory vznikly zmenšením hmotnosti a rozměrů zařízení. Velkou zásluhu na tom mají také integrované obvody, jejichž použití umožnilo zjednodušit konstrukci spínaných zdrojů a hlavně zvýšit spolehlivost. Při konstrukci spínaných zdrojů jsou kladeny mimořádné nároky na feritová jádra transformátorů, na usměrňovací diody i na výkonové tranzistory.“ [9]

3.1 Rozdíly mezi spínanými a lineárními zdroji

„Rozdíl mezi spínaným a lineárním zdrojem (se spojitou regulací) je hlavně ve způsobu použití výkonového regulačního členu. Ve spínaných zdrojích je výkonový člen zatěžován impulsně, tzn. je střídavě spínán a rozpínán. Jsou využity výhody impulsního režimu daného prvku. V impulsním režimu může být odebíraný impulsní výkon podstatně větší, než jaký je možné odebírat v lineárním režimu s použitím stejného výkonového prvku.“ [10]

3.2 Jednočinný měnič

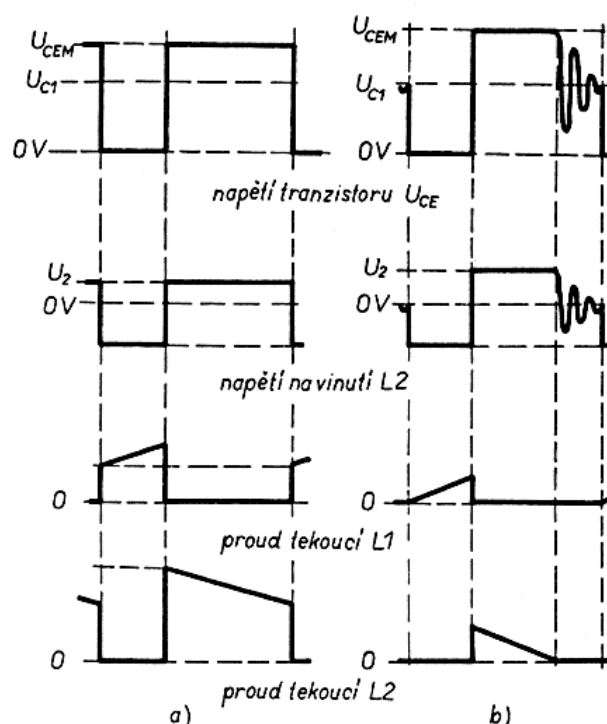
„Podstatná část zapojení jednočinného měniče je na obr. 3.1. Kondenzátor C1 slouží jako filtrační kondenzátor a je nabíjen usměrněným síťovým napětím. Protože pracovní kmitočet měniče je podstatně vyšší než kmitočet napětí sítě, představuje C1 po většinu času zdroj napětí pro měnič.“ [9]



Obr. 3.1: Zapojení jednočinného měniče [9]

3.2.1 Popis činnosti

„Jeden pracovní cyklus měniče lze rozdělit do několika částí. V první části sepne tranzistor T1 a připojí primární vinutí transformátoru L1 ke kondenzátoru C1. Proud vinutím se postupně zvětšuje, čímž se zvětšuje i magnetické pole v jádře transformátoru. Po určité době řídící elektronika zajistí rozepnutí tranzistoru T1. Ve snaze zachovat procházející proud, vybudí magnetické pole jádra ve vinutí L1 a L2 napětí opačné polarity. Protože nyní vinutím L1 proud prakticky neprochází, akumuluje se veškerá energie magnetického pole přes vinutí L2 a diodu D1 do zátěže. Výstupní napětí zdroje je dáno poměrem závitů vinutí L1 a L2, velikostí napájecího napětí na primární straně a poměrem časů, po něž je tranzistor otevřen a uzavřen. Průběhy napětí a proudu v některých místech měniče jsou na obr. 3.2a.

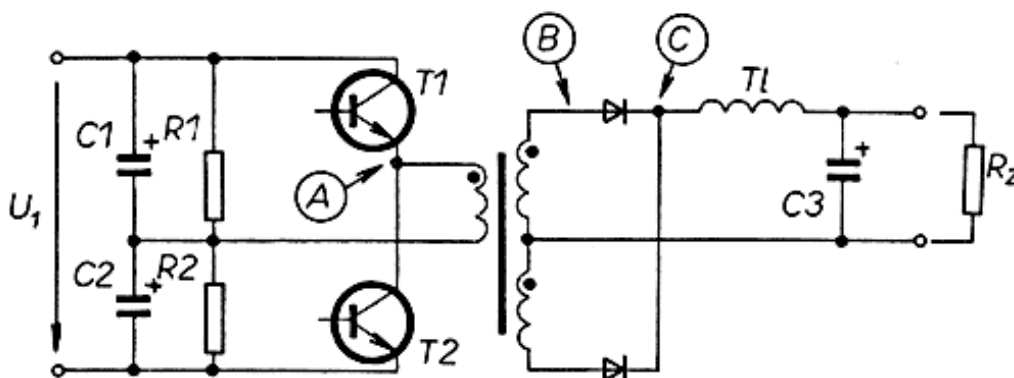


Obr. 3.2: Průběhy napětí v některých místech jednočinného měniče [9]

Je-li opakovací kmitočet měniče nízký, popř. je-li zdroj málo zatížen, může v praxi nastat případ, kdy magnetické pole v jádře zanikne dříve, než je tranzistor znovu sepnut. Na nyní nezatíženém vinutí transformátoru vzniknou tlumené kmity. Průběhy napětí v měniči jsou na obr. 3.2b. Tento stav není příliš nebezpečný, neboť amplituda kmitů je menší než pracovní rozkmit napětí. Zmenšuje se však účinnost měniče, a proto tento způsob činnosti nelze v rozsahu pracovní zátěže tolerovat.

3.3 Dvojčinný měnič (půlmůstek)

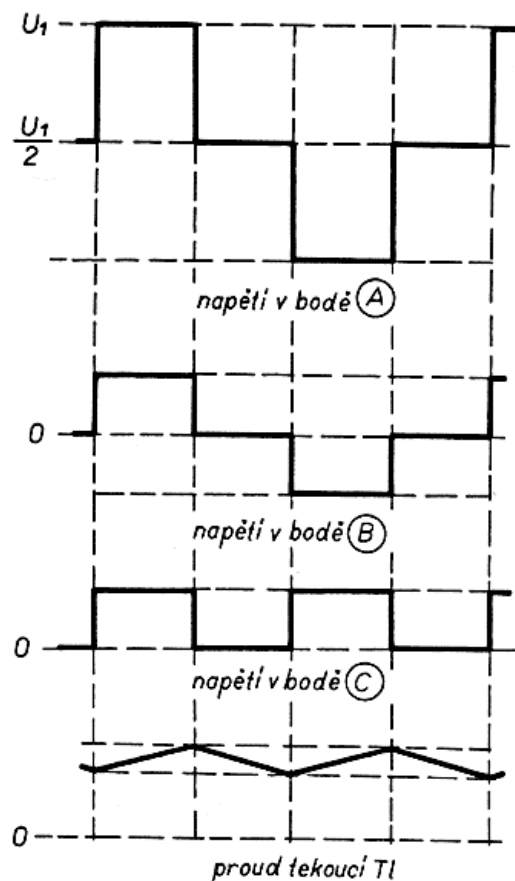
Při popisu funkce dvojčinného měniče je možno vycházet ze zapojení na obr. 3.3. Kondenzátory C1 a C2 slouží jako zásobník energie (stejně jako v případě jednočinného měniče kondenzátor C1). Rezistory R1 a R2 udržují ve středu děliče přibližně polovinu napájecího napětí. Do tohoto středu je připojen jeden konec primárního vinutí L1, druhý může být přes tranzistory T1 a T2 připojen na kladné nebo záporné napájecí napětí. Na sekundární straně je dvojčinný usměrňovač a pro funkci měniče důležitá tlumivka Tl.



Obr. 3.3: Zapojení dvojčinného propustného měniče [9]

3.3.1 Popis činnosti

Tranzistory T1 a T2 střídavě připojují primární vinutí na kladné nebo záporné napájecí napětí. Toto napětí se přímo transformuje na sekundární vinutí. Protože se v transformátoru nehromadí tolik energie ve formě magnetického pole jako u blokujícího měniče, může být transformátor podstatně menší. Tranzistory jsou vždy otevřeny po dobu kratší než je polovina periody, a proto na katodách diod D1 a D2 dostáváme pulsující stejnoměrné napětí, přičemž šířka impulsů odpovídá délce sepnutí tranzistoru T1 nebo T2. Výstupní napětí je úměrné velikosti napětí a šířce impulsů na katodách diod D1 a D2. Výstupní napětí se vlastně reguluje na tlumivce řízením doby sepnutí tranzistorů T1 a T2. Má-li zdroj několik výstupních napětí, jsou všechny tlumivky navinuty na společném jádře. To zajistí přibližně stejný poměr výstupních napětí i při rozdílné zátěži v jednotlivých větvích. Počet závitů a polarita vinutí musí být úměrná výstupním napětím. Průběhy napětí v některých místech měniče jsou na obr. 3.4.“ [9]



Obr. 3.4: Průběhy napětí v některých místech dvojčinného měniče [9]

3.3.2 Výhody zapojení

Mezi výhody zapojení patří:

- „vysoký výkonový rozsah
- malé indukčnost filtrační tlumivky
- vysoká účinnost
- poměrně nízké rušení vyzařováním

3.3.3 Nevýhody zapojení

Mezi nevýhody patří:

- dvě indukční součástky
- složitější vinutí transformátoru (půlené výstupní vinutí)
- vysoké nároky na součástky
- složitější obvody pro řízení
- nutnost prodlevy při spínání a rozpínání tranzistorů (dead time)“ [11]

4 Piezoelementy

Tato kapitola se zabývá rozdělením piezoelektrického jevu, podmínkami, za kterých může vzniknout, materiály a jejich použitím.

4.1 Historie

Piezoelektrický jev je již známý poměrně dlouhou dobu. Jeho historie sahá až do starověké Indie, kde vhazovali do žhavého popela turmalínové krystaly a sledovali, jak se části popela nejprve přitahovaly a potom odpuzovaly. Okolo roku 1700 se začal zkoumat piezoelektrický jev i v Evropě. Turmalín dostal v polovině 18. století jméno elektrický kámen. Pokusy se ale prováděly i na jiných krystalech např. krystal křemene, vápence. Za objevitele piezoelektrického jevu jsou považováni bratři Jacques a Pierree Curieové, kteří tento jev v roce 1880 detailně popsali. Jednalo se o přímý piezoelektrický jev. O rok později, roku 1881, oba bratři také popsali nepřímý piezoelektrický jev. Díky piezoelektrickému jevu byly poprvé roku 1917 použity sonary a od roku 1940 byly realizovány rozsáhle aplikace jako např. krystalové generátory, frekvenční měniče, mikrofony, gramofonové přenosky atd. Kolem roku 1965 byl dokončen vývoj piezoelektrické keramiky, což je látka, která se jeví jako nepiezoelektrická. Působí-li na ni ale vnější magnetické pole, je vyvolána polarizace a piezoelektrická keramika získá vlastnosti piezoelektrické látky.

4.2 Základní rozdělení piezoelektrického jevu a jeho princip

- *Přímý* - mechanické namáhání (tlak, tah, ohýbání, kroucení) krystalu vyvolává na plochách krystalu povrchové elektrické náboje. Jde v podstatě o polarizaci tlakem. Dosahujeme zde napětí řádově 10^{-7} V/Pa.
- *Nepřímý* - spočívající v deformaci krystalu po přivedení stejnosměrného napětí. Pokud je na krystal přivedeno napětí střídavé, krystal se rozkmitá.

4.3 Podmínky piezoelektrického jevu

„Piezoelektrické vlastnosti mají látky tvořící krystaly, které nemají střed souměrnosti (např. křemen, sfalerit, kyselina vinná, atd.). K průmyslové výrobě takového krystalu se používá materiál, v jehož krystalické mříži jsou jak kladné tak záporné ionty a destička se vybrousí ve vhodné orientaci tak, aby na jedné ploše

byly soustředěny náboje kladné a na druhé záporné. Tím se z vnějšího pohledu stane výbrus zdrojem elektrostatického pole, jehož intenzita (a tedy i napětí) závisí na plošné povrchové hustotě nábojů a na vzdálenosti nábojů uvnitř materiálu.

4.4 Hlavní oblasti použití piezoelementů

Přímý piezoelektrický jev je použit např. u zapalovačů, v gramofonových přenoskách i v piezoelektrických mikrofonech.

Nepřímý piezoelektrický jev je důležitější pro technické použití, zvláště pro piezoelektrické oscilátory ve vysokofrekvenční technice.“ [5]

Dále se piezoelementy používají jako sonary, frekvenční měniče, filtry, nebo akční členy jako např. mikroposuvy, zdroje síly atd.

4.5 Funkční módy

Piezoelektrické akční členy pracují ve dvou základních funkčních módech:

- „statickém (senzory, akční členy)
- rezonančním (generátory, filtry, akustické měniče)“ [4]

4.5.1 Parametry charakterizující práci ve statickém režimu

Tento režim se vyznačuje tím, že dokáže pracovat s vysokým napětím, realizuje malé posuvy s velkou silou a má bezúdržbový provoz.

4.5.2 Parametry charakterizující práci v rezonančním režimu

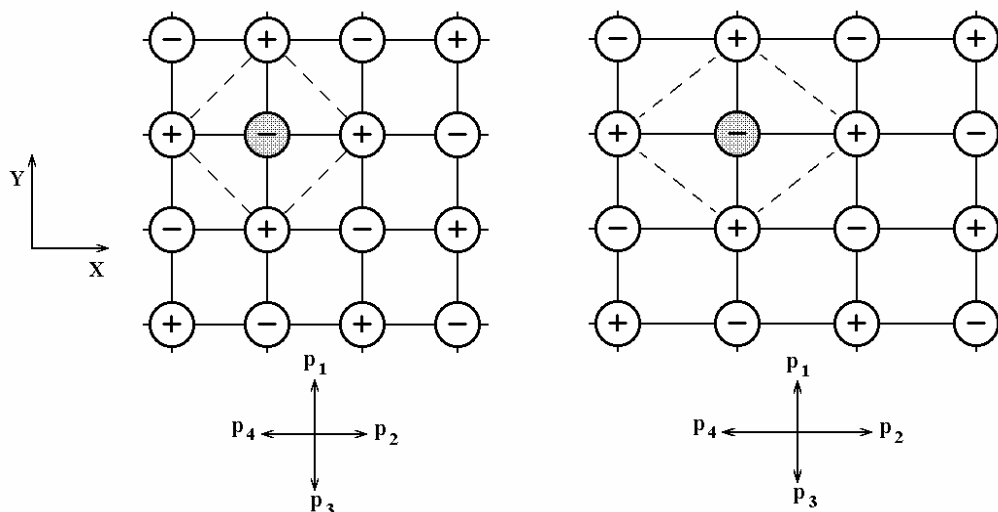
Tento režim využívají např. oscilátory. Ty pracují na určité frekvenci, kde mají největší rozkmit., dále např. akustické měniče, což je vlastně „akustická houkačka.“ Ta má také na rezonanční frekvenci největší rozkmit.

4.6 Fyzikální podstata piezoelektrického jevu

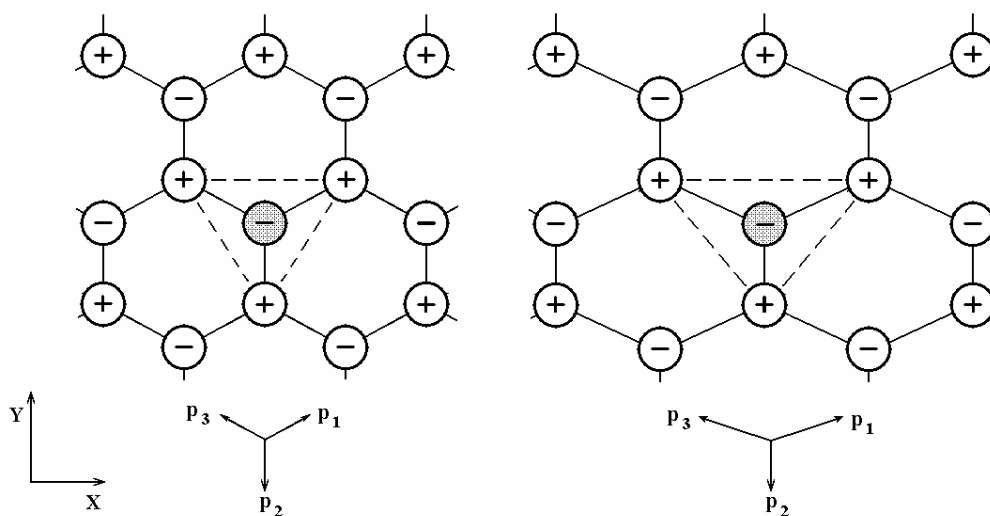
„Jestliže ve čtvercové mřížce obr. 4.1 vyznačíme vektory dipólmomentů **Chyba! Záložka není definována.** \vec{p}_1 až \vec{p}_4 orientovaných ve směru spojnic mezi označeným iontem základní buňky a ostatními ionty buňky, pak polarizace $\hat{P} = \sum_i \vec{p}_i = 0$ **Chyba!**

Záložka není definována. tj. bude nulová v klidovém i deformovaném stavu.

Naproti tomu v šestiúhelníkové mřížce obr. 4.2, která odpovídá např. krystalu křemene SiO_2 , po deformaci tahem nebo tlakem ve směrech uvedených os, není již označený iont středem symetrie a nastává polarizace, tj. $\hat{P} = \sum_i \vec{p}_i \neq 0$.“ [4]



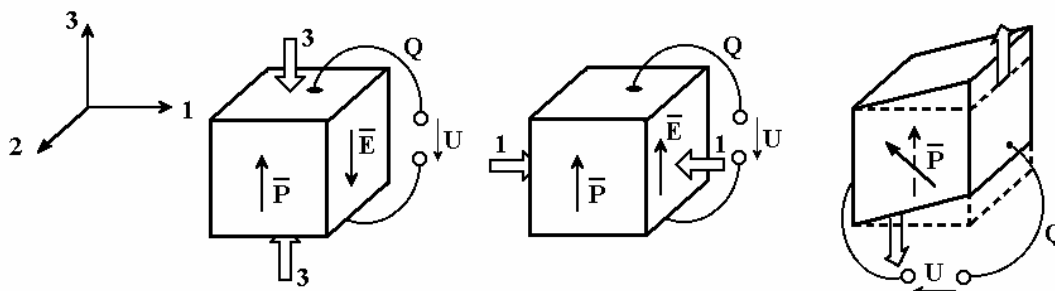
Obr. 4.1: Čtvercová krystalová mřížka [4]



Obr. 4.2: Šesterečná krystalová mřížka [4]

4.7 Základní piezoelektrické jevy

Piezoelektrický jev lze vyvolat třemi základními způsoby (obr. 4.3). Z obrázku je patrné, že podélný piezoelektrický jev se vyvolá deformací krystalu ve svislé ose krystalu, příčný piezoelektrický jev deformací krystalu v podélné ose krystalu a stříhový piezoelektrický jev vzniká působením tlaku na dvě vnější strany krystalu a to tak, že jedna působící síla má opačný směr než druhá působící síla.



Obr. 4.3: Piezoelektrický jev podélný, příčný a střihový [4]

4.8 Materiály pro piezoelektriku a jejich příklady

- a) „krystalické piezoelektrické látky (monokrystaly)
- b) polykrytalické piezoelektrické látky (piezoelektrická keramika)
- c) organické polymery (piezoelektrické polymery)“ [4]

4.8.1 Krystalické piezoelektrické látky (monokrystaly)

Existuje sedm krystalických soustav, ve kterých je celkem 32 oddělení (v každé soustavě je jiný počet oddělení). Ale pouze 20 oddělení má piezoelektrické vlastnosti (např. materiál lithium niobát).

4.8.2 Polokrystalické keramické materiály (piezoelektrická keramika)

Tyto látky se stávají piezoelektrickými pouze jsou-li vloženy do elektrického pole a zpolarizují se. Téměř vždy se jedná o tzv. tuhé roztoky (např. olovozirkonáttitanát – PTZ).

4.8.3 Organické polymery (piezoelektrické polymery)

Tyto materiály jsou velmi obtížné na technologické zpracování (např. polyvinylchlorid – PVC).

5 Piezomotory

„V současné době mnoho firem a výzkumných pracovišť pracuje na vývoji nových motorů využívající nepřímý piezoelektrický jev.

5.1 Rozdělení piezomotorů dle funkčního principu podle Sadayuki Ueha

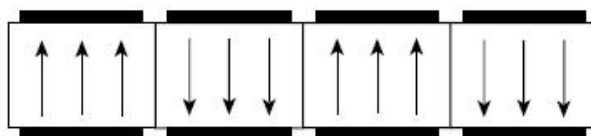
- piezoelektrické motory využívající stojaté vlny
- piezoelektrické motory využívající postupnou elastickou vlnu
- piezoelektrické motory využívající mód dvojité vibrace (využívá se konverze k získání dvou vibračních módů, které jsou vyvolány jedním piezoelektrickým prvkem, motor je buzen pouze jedním harmonickým signálem, a nelze tedy realizovat reverzaci chodu motoru)
- piezoelektrické motory využívající vícenásobný vibrační mód (motor používá jeden tzv. multi-mode vibrátor, který je buzen jedním nebo dvěma piezoelektrickými prvky – pro konstrukci motoru mohou být využívány různé vibrační módy)
- piezoelektrické motory využívající radiální kmity a osově nesymetrický vibrační mód
- piezoelektrické motory hybridní (využívají se dva oddělené vibrační systémy, které pracují zcela nezávisle)“ [6]

5.2 Způsoby buzení

Pro buzení piezomotorů je možné využít tří základních způsobů – Buzení postupnou vlnou, číslicovou vlnou a pulsně šířkovou modulací (PWM).

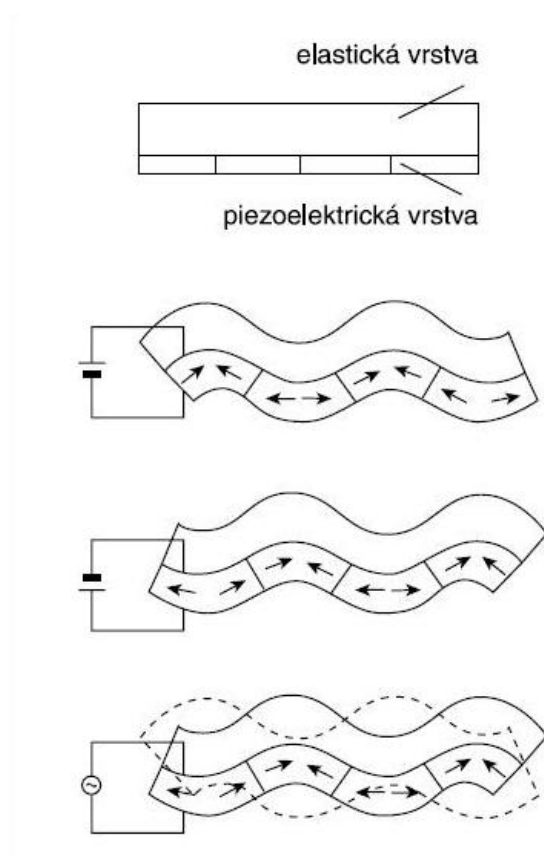
5.2.1 Buzení postupnou (podélnou) elastickou vlnou

„Předpokládejme piezoelektrickou vrstvu, ve které se střídají opačně polarizované úseky (obr. 5.1). Přiložením stejnosměrného napětí mezi elektrody nastane objemová deformace piezoelektrického elementu. Předpokládejme, že úseky, které jsou polarizovány v jednom smyslu, zvětší svoji tloušťku, zatímco úseky polarizované opačně se zeslabí.



Obr. 5.1: Střídavě polarizovaná piezoelektrická vrstva [6]

Spojíme-li pevně s piezoelektrickým prvkem elastickou vrstvu, nastane při přiložení stejnosměrného napětí sinusové prohnutí elastické vrstvy (obr. 5.2). Při přiložení střídavého napětí vznikne stojatá vlna (obr. 5.2). V elastické vrstvě se vybudí stacionární elastická deformace.“ [6]



Obr. 5.2: Deformace vlivem přiloženého napětí [6]

„Spojíme-li dvě piezoelektrické vrstvy se střídajícími se úseky opačné polarizace podle obr. 5.3 (délka úseku je $\lambda/2$) tak, že mezi úseky jedné a druhé vrstvy bude posuv o polovinu délky úseku (tj. $\lambda/4$), dostaneme piezoelektrický měnič, který je schopný generovat postupnou povrchovou elastickou vlnu.

Připojíme-li na elektrodu 1 střídavé napětí $u_1(t) = U_1 \sin(\omega t)$ s vhodně zvoleným kmitočtem, jehož vlnová délka odpovídá délce dvou úseků, vybudí piezoelektrický

prvek pod elektrodou 1 stojaté vlny. Zvolíme-li orientaci piezoelektrického měniče tak, že osa z bude kolmá k povrchu měniče, lze elastické posunutí povrchového bodu A piezoelektrické vrstvy pod elektrodou 1 ve směru osy z popsat rovnicí 5.1.

$$u_z^{(1)} = U \cdot \sin(kx) \cdot \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

kde

U je maximální rozkmit povrchového bodu, který je závislý na velikosti napětí U_1

v rychlost šíření postupné elastické vlny ve směru osy x

$k = \omega/v$ vlnové číslo

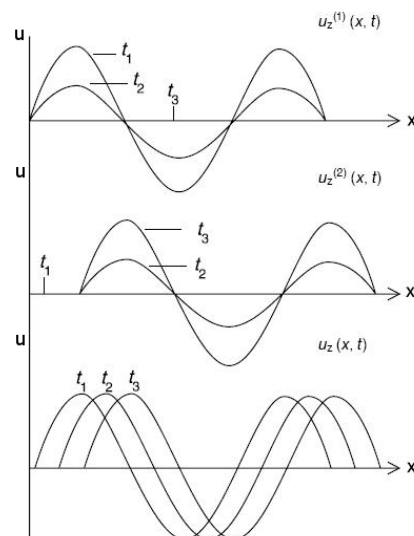
Přiložíme-li na elektrodu 2 střídavé napětí $u_2(t) = -U_1 \cdot \cos(\omega t)$, vybudí piezoelektrický prvek pod elektrodou 2 také stojaté vlny. Elastické posunutí povrchového bodu B piezoelektrické vrstvy pod elektrodou 2 ve směru osy z bude:

$$u_z^{(2)} = U \cdot \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) \quad (5.2)$$

Fázový posuv mezi jednotlivými průběhy ohybové deformace je $\lambda/4$. Složením dvou posunutí získáme výsledné elastické posunutí $u_z(x, t)$, které má charakter postupné elastické vlny postupující ve směru osy x (obr. 5.4).“ [6]



Obr. 5.3: Struktura piezoelektrického měniče (měnič tvoří dvě vrstvy) [6]



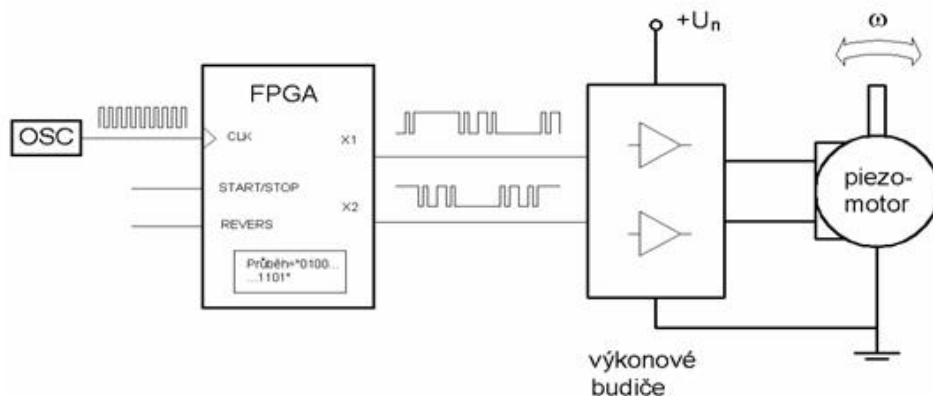
Obr. 5.4: Zobrazení vzniku postupné elastické vlny [6]

5.2.2 Buzení číslicovou vlnou

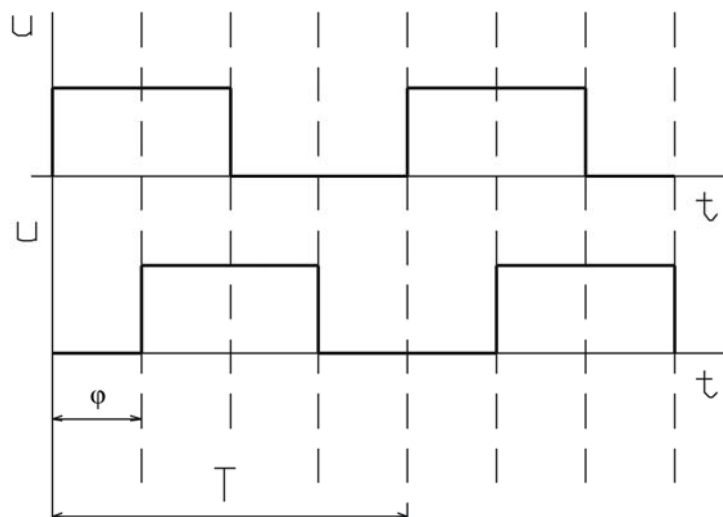
Číslicovou vlnu můžeme popsat rovnicí pro neharmonický periodický průběh.

$$u(t) = U \cdot (t + kT) \quad (5.3)$$

Do jisté míry universální měnič frekvence je možné považovat měnič na obr. 5.5., na něm je zobrazen programovatelný logický obvod FPGA, který dokáže při zadání algoritmu generovat průběhy zadaných vlastností (obr.5.6). Ty jsou pak využity jako vstupní signály výkonového budiče. Toto blokové schéma také zajišťuje řízení otáček. Elektronický systém musí být snadno přeprogramovatelný, protože každý piezomotor má jiné vlastnosti (např. rezonanční frekvenci) a také závisí na druhu použití celého obvodu.



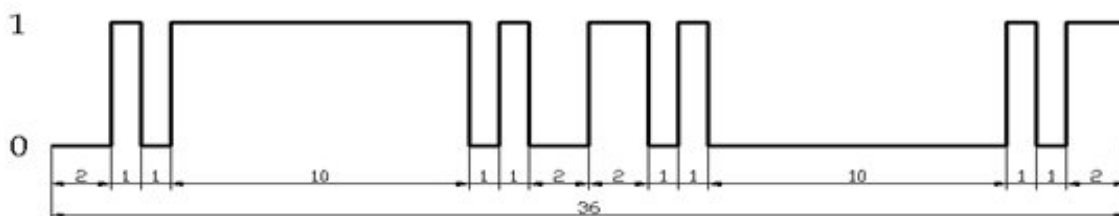
Obr. 5.5: Schéma obvodu generující pevně zadaný průběh [12]



Obr. 5.6: Zobrazení číslicových signálů posunutých obecně o úhel ϕ

Chceme-li harmonický periodický průběh nahradit průběhem stupňovitým nebo impulsovým, musíme signál nahradit více vzorky. Celou periodu rozdělíme na 12, 24, 36 vzorků.

- „pro unipolární periodický signál
 - a) $[\underline{0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0}\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$
 - b) $[\underline{0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0}\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]$
 - c) $[\underline{0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0}\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1]$
- pro bipolární periodický signál
 - d) $[0, +1, +1, +1, +1, 0, 0, -1, -1, -1, -1, 0]$ [12]

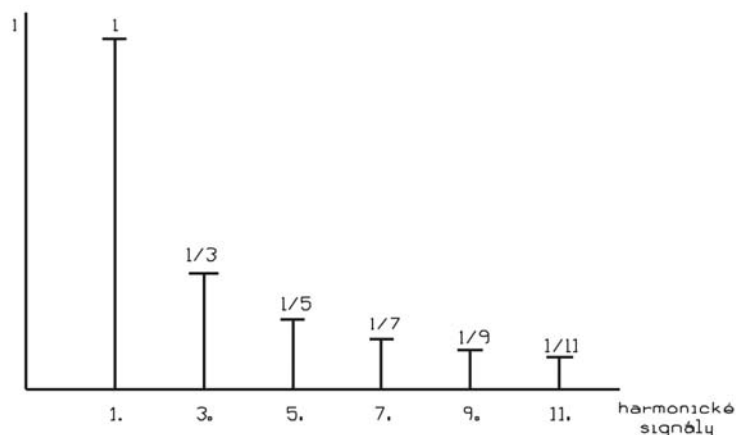


Obr. 5.7: Budící signál popsáný 36 vzorky [12]

Tab. 5.1: Relativní amplitudy harmonických složek signálů vzhledem k základní harmonické [12]

Složka signálu	Amplituda [%]			
Označení signálu:	a)	b)	c)	Obdélník
1.	100	100	100	100
3.	0,00	0,00	0,00	33,3
5.	20,0	10,4	5,89	20,0
7.	14,3	23,3	4,66	14,3
9.	0,00	0,00	0,00	11,1
11.	9,12	28,6	15,8	9,09

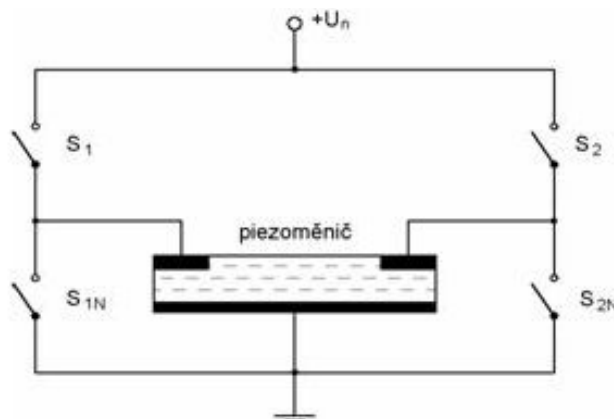
Celou periodu rozdělíme na 36 vzorků, což odpovídá případu c) pro unipolární periodický signál. Ten je graficky popsán na obr. 5.7. Takto přesné rozdělení signálu způsobí, že 3. harmonická je nulová, 9. harmonická je také nulová, 5.harmonická klesá na téměř zanedbatelnou hodnotu. Výrazná je až 11. harmonická, což lze považovat za téměř sinusový průběh signálu, kterého chceme dosáhnout. Pokud rozdělíme periodu ještě na více dílů, sinusový průběh se neustále přibližuje ideálnímu.



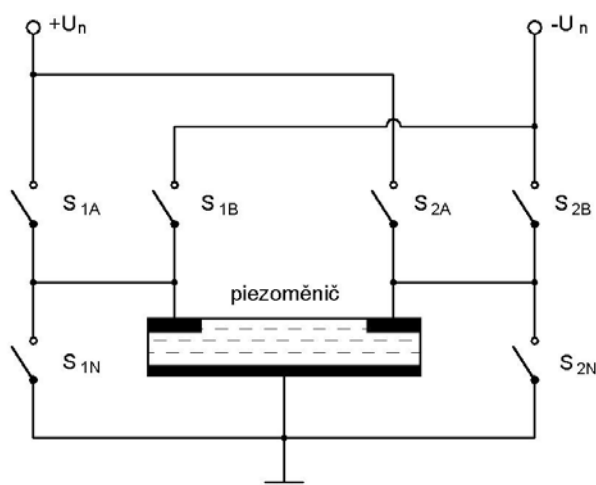
Obr. 5.8: Harmonické signály

Spínače pro unipolární a bipolární signály

„Spínače S_1 a S_{1N} , resp. S_2 a S_{2N} na obr. 5.9 jsou řízeny příslušnými signály $X1$ a $X1N$, resp. $X2$ a $X2N$. Průběh označený d) se vyznačuje dostatečným potlačením nízkých složek frekvenčního spektra. Při použití tohoto budícího signálu je nutno zajistit spínání elektrod piezomotoru ve dvou polaritách, čehož lze dosáhnout pomocí zdroje se symetrickým napájením a přídatnými spínači S_{1B} a S_{2B} (obr. 5.10). Dále je třeba upravit generátor logických budících signálů – rozšířit ho o další signály potřebné pro řízení přídatných spínacích prvků.“ [12]



Obr. 5.9: Schéma budiče určeného pro unipolární signály [12]



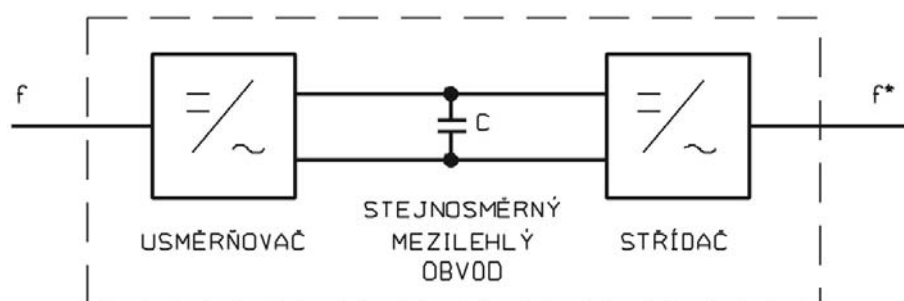
Obr. 5.10: Schéma budiče určeného pro bipolární signály [12]

Obecné požadavky na budící neharmonický signál:

- „zkladní harmonická budícího průběhu musí být konstantní
- budící signál musí vhodně aproximovat sinusový průběh
- signál musí být takový, aby amplitudy nízkých frekvenčních složek, počínaje druhou harmonickou, byly malé
- musí být možno měnit střední hodnotu budícího signálu, a tím řídit otáčky motoru
- aby generování signálu bylo snadné, je účelné, aby změny impulsního budícího signálu byly v ekvidistantních časových okamžicích“ [12]

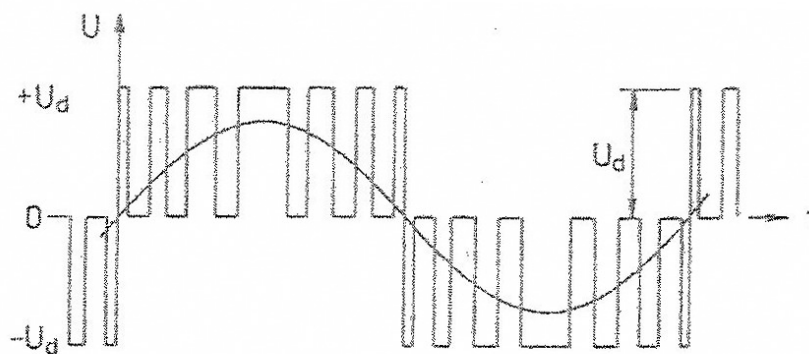
5.2.3 Buzení pulsně šířkovou modulací (PWM)

„Moderní způsoby řízení napěťových střídačů zajišťují současnou změnu výstupního kmitočtu a amplitudy základní harmonické výstupního napětí. Pro řízení napěťových střídačů se v současné době používají řídicí algoritmy založené na pulsní šířkové modulaci. Jedná se o nejčastější způsob řízení napěťových střídačů (obr. 5.11), umožňující současnou změnu kmitočtu a velikosti výstupního napětí základní harmonické výstupního průběhu napětí. Napětí jedné fáze se skládá z kladných a záporných pulsů, které mají konstantní amplitudu a proměnnou šířku, která se mění tak, aby výsledná základní harmonická těchto obdélníkových průběhů byla sinusoida žádaného kmitočtu. Vyšší harmonické proudy jsou do určité míry filtrovány indukčností zátěže. Průběh proudu se potom blíží sinusovému. Vlivem indukčnosti zátěže jsou vůči sobě základní harmonické proudy a napětí posunuty. Spínací kmitočet střídače je dán přípustným kmitočtem jednotlivých prvků. Velikost tohoto kmitočtu je omezena technickými parametry spínacích prvků (1 kHz až 100 kHz). Při dostatečně vysokém spínacím kmitočtu je oblast vyšších harmonických tohoto nosného kmitočtu dostatečně daleko od požadované statorové frekvence, a je možno tyto vyšší harmonické snadno odfiltrovat.“ [8]

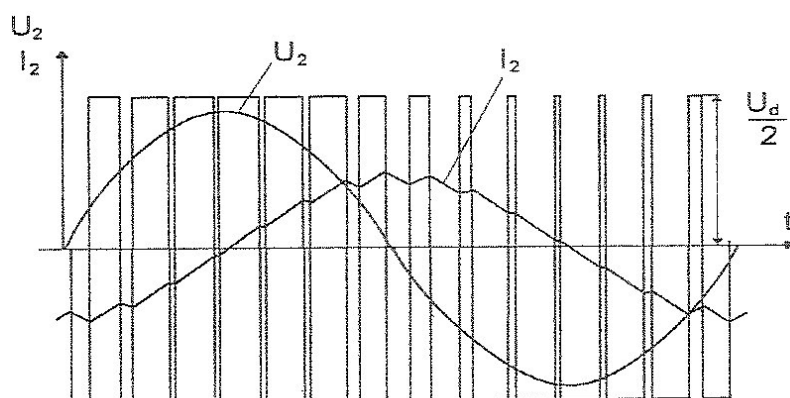


Obr. 5.11: Napěťový měnič

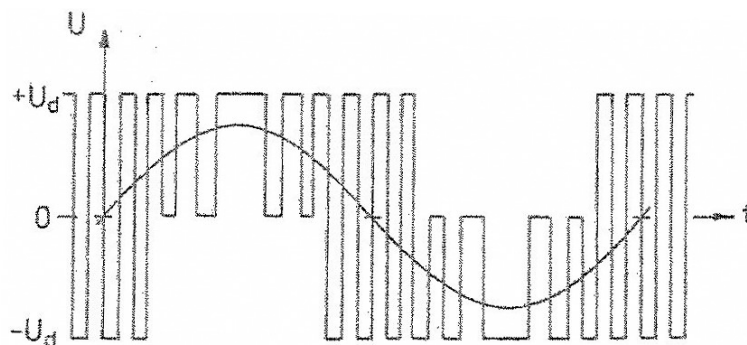
„Podle časové posloupnosti spínání jednotlivých výkonových prvků lze způsoby řízení rozdělit na unipolární a bipolární řízení. Při unipolárním řízení (obr. 5.12) je na zátěži v průběhu jedné poloviny periody pouze jedna polarita napětí nebo napětí rovné nule. Při bipolárním řízení (obr. 5.13) je na zátěži v obou polovinách periody střídavé napětí obou polarit. Na obr. 5.14 je uveden průběh částečně bipolárního způsobu řízení.“ [8]



Obr. 5.12: Unipolární řízení [8]



Obr. 5.13: Bipolární řízení [8]



Obr. 5.14: Částečné bipolární řízení [8]

Pomocí hradlového pole vytvoříme sinusový signál PWM, který má přijatelně potlačené nižší složky frekvenčního spektra. Generování takového signálu ovšem klade velmi vysoké nároky na parametry výkonových spínacích členů. Jako příklad lze uvést požadavek na výkonový budič v podmínkách, kdy rezonanční frekvence motoru $f_R = 75 \text{ kHz}$ a frekvence oscilátoru $f_{OSC} = 25,175 \text{ MHz}$.

$$P_{VZORKŮ} = \frac{f_{OSC}}{f_R} = \frac{25,175 \cdot 10^6}{75 \cdot 10^3} = 335,67 \approx 336 \text{ vzorků} \quad (5.4)$$

Periodu tedy můžeme v tomto případě rozdělit maximálně na 336 vzorků, což je poměrně vysoké číslo. I přesto lze toto rozdělení realizovat poměrně jednoduchým obvodem FPGA (obr. 5.5). Obecně lze říci, že čím vyšší počet vzorků na periodu, tím vyšší musí být vzorkovací frekvence. Spínat takto dynamický průběh je velmi obtížné a nároky jsou kladeny především na spínací polovodičové prvky. Ty by měly mít délku náběžné i sestupné hrany co možná nejkratší, takže by se měly blížit ideálnímu impulsu. Požadavky na tyto vlastnosti splňují unipolární tranzistory MOSFET, které mají náběžné a sestupné hrany v řádech desítek nanosekund. Z toho vyplývá, že je nezbytné rozhodnout, jaké signály má smysl spínat a jaké signály už se spínat nedají. Vycházíme-li z příkladu, kdy se perioda dlouhá 13,3 μ s rozdělí na 336 vzorků, je nutné použít tranzistor, který zaručuje dobu sepnutí menší než 40 ns.

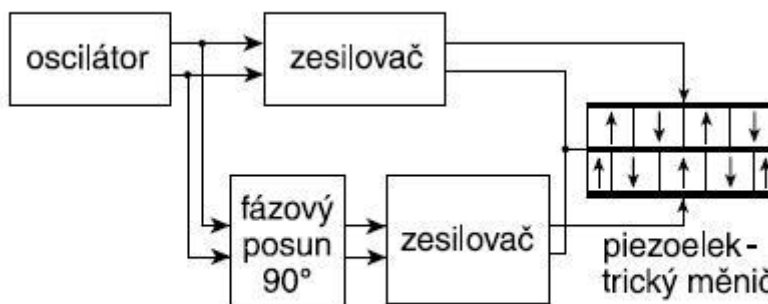
$$t_{SEPNUTÍ} = \frac{T}{P_{VZORKŮ}} = \frac{13,3 \cdot 10^{-6}}{336} = 39,58 \cdot 10^{-9} \approx 40 \text{ ns} \quad (5.5)$$

5.3 Zapojení výkonových budičů

„Každý piezoelektrický motor musí být vybaven speciálním výkonovým budičem, jehož zapojení závisí na typu motoru, jeho výkonu a dalších požadavcích kladených na funkci pohonu. Budič musí zajistit generování jednotlivých signálů, jejich správný kmitočet, fázový posuv, výstupní impedanci a výstupní výkon. Při návrhu budiče je nutné správně navrhnout impedanční přizpůsobení, protože impedance piezoelektrického motoru (piezoelektrického měniče) je silně frekvenčně závislá. Při návrhu zapojení budiče je také nutné zohlednit požadavky na řízení piezoelektrického motoru. Pracuje-li motor s postupnou vlnou a piezoelektrický měnič se skládá ze dvou vrstev, v nichž se střídají opačně polarizované úseky a měnič kmitá příčnými kmity, je možné budič realizovat podle obrázku obr. 5.6.“ [6]

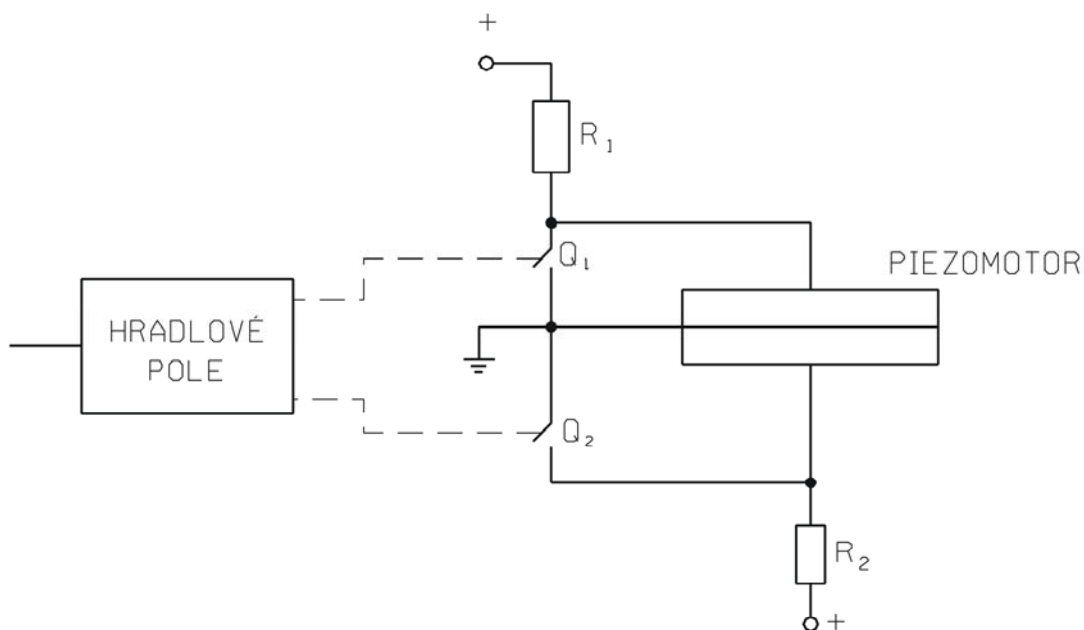
Ve většině případů je piezomotor buzen sinusovými harmonickými signály vystupujícími z oscilátoru, který je generuje s pevně danou frekvencí i amplitudou. Tyto průběhy na jedné straně vstupují do zesilovače 1, zesílí se na požadovanou amplitudu a na druhé straně vstupují do bloku, kde se vůči sobě fázově posouvají o 90° ($\pi/2$). Odtud signály putují do druhého zesilovače 2, který by měl mít totožné parametry jako zesilovač 1, aby nedocházelo ke zkreslení průběhů. Oba periodické průběhy se setkávají

na svorkách piezomotoru, ovšem v různých časových okamžicích a s fázovým posunutím. V závislosti na tom, jak velká bude amplituda přiváděného vstupního napětí do budicího obvodu, budou stoupat, nebo naopak klesat, otáčky piezomotoru. Velikost otáček je tedy přímo úměrná amplitudě budicího napětí. Frekvence harmonického průběhu závisí na rezonanční frekvenci piezomotoru a indukčnosti budicího obvodu (obr. 5.15).



Obr. 5.15: Buzení měniče s postupnou elastickou vlnou (blokové schéma) [6]

Obr. 5.15 zobrazuje schéma zapojení výkonových budičů. Na vstup hradlového pole přicházejí řídicí impulsy z externího generátoru, které určují požadovanou frekvenci. Pokud hradlové pole sepne spínač Q_1 , začne procházet proud přes rezistor R_1 a na piezomotoru bude kladné napětí. Totéž platí i při průchodu proudu přes rezistor R_2 . Hradlové pole je v tomto případě naprogramované tak, aby fyzicky posouvalo fázové průběhy. Díky tomu spínače spínají v různém časovém okamžiku. Není-li spínač sepnutý, piezomotor je spojen se zemí přes vyvedený střed.



Obr. 5.16: Schéma výkonových budičů

5.4 Výhody piezoelektrických motorů

- „větší jmenovitý moment na hřídeli ve srovnání s klasickými motory stejného objemu
- snadné řízení otáček
- velký brzdný moment v klidovém stavu (nevyžaduje žádné přídavné prvky)
- malý moment setrvačnosti rotoru
- tichý chod
- možnost realizovat miniaturní motorky
- nevytvářejí elektromagnetické rušení“ [6]

5.5 Nevýhody piezoelektrických rotačních motorů

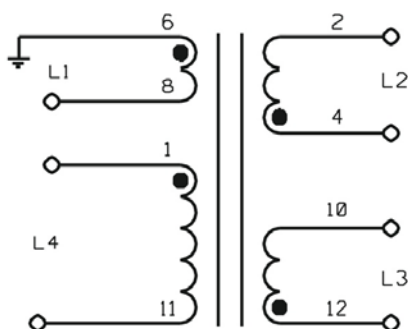
- „obtížné dodržení konstantního koeficientu tření mezi rotorem a statorem
- nutnost použít speciální budicí obvod
- možnost realizovat motory pouze malého výkonu“ [6]

6 Měření na transformátoru

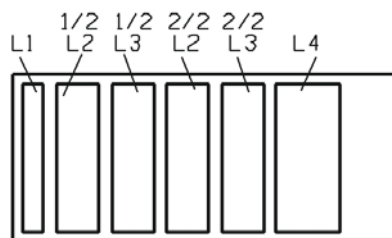
Vyrobený transformátor má jedno primární vinutí a tři sekundární vinutí. Z toho jsou dvě sekundární vinutí hlavní a jedno pomocné. Počty závitů vinutí a průměr vodičů, kterými jsou vinutí navinuta, jsou uvedeny v tab.6.1.

Obr. 6.1 zachycuje, jak je vinutí transformátoru rozděleno. Tečka u jednotlivých vodičů označuje začátek vinutí.

Sekundární vinutí L2 a L3 jsou rozdělena na polovinu. Každá polovina je navinuta zvlášť (obr. 6.2).



Obr. 6.1: Rozdělení vinutí transformátoru



Obr. 6.2: Skutečný transformátor

Tab. 6.1: Přehled vinutí transformátoru, síla vodičů a počty závitů vinutí

	Síla vodiče [mm]	Počet závitů [záv.]	Piny	Poznámka
vinutí L1	0,26	5	6-8	Pomocné vinutí
vinutí L2	0,26	125	2-4	-
vinutí L3	0,26	125	10-12	-
vinutí L4	8×0,60	14	1-11	-

Připojený transformátor v obvodu, respektive jeho hlavní sekundární vinutí L2 a L3 se chovají velmi dobře, protože rozdíl mezi absolutními hodnotami výstupního napětí bez zátěže je roven 0,4V.

6.1 Měření fázových posuvů

V tomto měření je třeba zejména zjistit fázové posuvy transformátoru. Měření bylo provedeno nejprve bez vzduchové mezery a následně s malou vzduchovou mezerou v jádře transformátoru. Z naměřených výsledků lze vypočítat převod transformátoru vztahem 6.1.

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (6.1)$$

Na vstupní vinutí transformátoru je připojen frekvenční generátor, na kterém je nastavena frekvence $f = 20\,000\text{ Hz}$ a zdroj napětí na $U_{pp} = 10\text{ V}$ (špička-špička). Pomocí osciloskopu je připojen jeden OUT na vstupní vinutí transformátoru (RMS1) a druhý OUT je postupně připojován přes napěťovou sondu na jednotlivé sekundární vinutí transformátoru (RMS2) – vždy na začátek a konec vinutí. Zemní vodič je připojen na konec vinutí a sonda na začátek vinutí.

Rozdíl mezi amplitudami napájecího napětí je $U_{pp} = 10\text{ V}$. Z toho vyplývá, že amplitudové napětí $U_M = 5\text{ V}$ a efektivní hodnota napětí je:

$$U_{ef} = \frac{U_{pp}}{2} = \frac{10}{2} = 5\text{ V}$$
$$U_{ef} = \frac{2}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{2}} = 3,536\text{ V} \quad (6.2)$$

Tab. 6.2: Měření bez vzduchové mezery

RMS1 [V]	RMS2 [V]	Fázový posuv [°]	Piny	Převod [-]
2,453	2,511	0	1-11	1,013
2,561	23,110	-180	2-4	0,111
2,538	0,709	180	6-8	3,580
2,565	23,163	180	10-12	0,111

Příklad výpočtu převodu transformátoru:

$$p = \frac{RMS1}{RMS2} = \frac{2,511}{2,453} = 1,013 \quad (6.3)$$

Tímto měřením jsem zjistil, že při výrobě transformátoru jsem prohodil začátek s koncem primárního vinutí L4, které je na svorkách 1 a 11 transformátoru. Záměna svorek je patrná z tab.6.2 ve sloupci fázový posuv. Zde by měly být hodnoty pohybující se okolo 0° a ne fázově posunuté hodnoty. Ukázka takto otočených fází je v příloze A, snímek 1. Tuto chybu jsem odstranil a měření provedl znovu. Hodnoty jsou zaneseny

v tab. 6.3. Osciloskopická měření, již správně zvolených vývodů, reprezentuje snímek 2), v příloze A.

Tab. 6.3: Měření bez vzduchové mezery (správně začátek a konec primárního vinutí L4)

RMS1 [V]	RMS2[V]	Fázový posuv[°]	Piny	Převod [-]
2,423	2,386	0	1-11	1,016
2,441	21,923	0	2-4	0,111
2,435	0,677	0	6-8	3,597
2,401	21,575	-2	10-12	0,111

V jádře transformátoru byla vytvořena malá vzduchová mezera, kam se nakumuluje energie transformátoru a měření bylo opakováno. Výsledky jsou zachyceny v tab. 6.4. Měření odpovídá snímek 3) v příloze A.

Tab. 6.4: Měření s malou vzduchovou mezerou

RMS1 [V]	RMS2 [V]	Fázový posuv [°]	Piny	Převod [-]
0,292	0,283	-3	1-11	1,032
0,294	2,52	-2	2-4	0,117
0,294	0,073	-3	6-8	4,027
0,294	2,522	-3	10-12	0,117

Porovnáme-li tab. 6.3 a tab. 6.4 je zjevné, že vzduchová mezera způsobí výrazný pokles napětí na primárním vinutí. V důsledku toho se na sekundárním vinutí indukuje také menší napětí (tab. 6.4). Důkazem, že měření bylo provedeno správně je fakt, že převod transformátoru se téměř nezměnil.

6.2 Rozptylová indukčnost

Rozptylová indukčnost je taková indukčnost, která se téměř neúčastní chodu transformátoru, protože je rozptýlena do okolí.

Měření bylo provedeno vždy se zkratovanými svorkami příslušného vnutí. Tomuto měření odpovídá v příloze A snímek 4).

Tab. 6.5: Rozptylová indukčnost

	RMS1 [mV]	RMS2 [mV]	Převod [-]
nezkratované piny	285	24,3	11,7
zkratované piny 10 a 12	20,6	3,90	5,29
zkratované piny 6 a 8	146	13,6	10,8
zkratované piny 2 a 4	23,8	11,1	2,14

Tab. 6.6: Použité přístroje

Název	Sériové číslo
RIGOL DG3061A	DG3G102700524
AGILENT 54622D	MY40004115

Měření se vzduchovou mezerou 1 mm

Tímto měřením byla především ověřena funkčnost transformátoru. Malá vzduchová mezera byla nahrazena definovanou vzduchovou mezerou o velikosti 1 mm, tzn. 0,5 mm na každé straně feritového jádra.

Měření bylo realizováno na RLC metru. Tento měřicí přístroj neměří přímo odpor vinutí, proto byla změřena jakost vinutí Q a indukčnost L . Pokud jsou známy tyto dvě veličiny, odpor vinutí je možno dopočítat ze vztahu (6.4). Je nutné si dát pozor při dosazování za ω ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$), kde se frekvence nerovná 50 Hz, jak jsme zvyklí u síťového transformátoru. Protože jde o spínaný vysokofrekvenční transformátor, hodnota frekvence byla nastavena na generátoru na $f = 1$ kHz (tab. 6.7).

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R} \quad (6.4)$$

Tab. 6.7: Měření se vzduchovou mezerou 1 mm

	Q[-]	L[mH]	R[mΩ]
Primární vinutí L4	6,05	0,05	52,4
Sekundární vinutí L1	0,22	0,003	174
Sekundární vinutí L2	9,12	4,29	2950
Sekundární vinutí L3	8,69	4,23	3060

Na primární vinutí byly připojeny přírodní vodiče RLC metru a dílčí sekundární vinutí zkratována. Tím byla změřena na zkratovaných svorkách jakost vinutí Q , indukčnost vinutí L a dopočítán odpor vinutí R ze vztahu (6.5). Hodnoty jsou zaznamenány v tab. 6.8.

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R} \Rightarrow R = \frac{\omega \cdot L}{Q} \quad (6.5)$$

Veličina L reprezentuje součet indukčností $L = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$ z náhradního schéma transformátoru (obr. 2.2). Při výpočtu indukčnosti pro jedno či druhé vinutí, je třeba uvažovat, že jsou indukčnosti stejně velké a tudíž je možné rozdělit je přesně na polovinu. Vynásobením této hodnoty převodem transformátoru bude výsledek pro konkrétní indukčnost $X_{2\sigma}'$ (tab. 6.8).

Tab. 6.8: Měření se vzduchovou mezerou 1mm při zkratovaných svorkách jednotlivých výstupních vinutí

	Q[-]	L[μH]	R[mΩ]	X'_{2σ} [μH]
zkrat na L1	3,42	49,2	90,4	2190
zkrat na L2	0,19	2,20	72,4	97,9
zkrat na L3	0,16	1,90	76,1	84,6
zkrat na L2, L3	0,18	1,70	59,7	75,7

Příklad výpočtu $X'_{2\sigma}$ pro vinutí L2:

$$X'_{2\sigma} = \frac{L}{2} \cdot p^2 = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 89 = 97,9 \mu H \quad (6.6)$$

Aby se správnost měření a výpočtů ověřila, vypočte se opět odpor vinutí, ale pomocí předchozího měření při nezkratovaných svorkách sekundárního vinutí. Odpor vinutí by měl mít hodnotu součtu primárního odporu vinutí a příslušného nezkratovaného sekundárního vinutí. Tuto hodnotu je nutné přepočítat přes převod transformátoru. Navržený transformátor má převod 1:9.

Převod transformátoru

Chyba! Záložka není definována.

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{8} \quad (6.7)$$

Impedance primárního(Z_1) a sekundárního vinutí(Z_2)

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad (6.8)$$

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad (6.9)$$

Převod transformátoru na druhou

$$p^2 = \frac{Z_1}{Z_2} \Rightarrow p = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \quad (6.10)$$

Celkový odpor vinutí je tedy součet primárního odporu vinutí a přepočítaného nezkratovaného sekundárního vinutí (tab.6.9).

Tab. 6.9: Celkový odpor vinutí

	R[mΩ]
R_{ZKR.L1}	54,308
R_{ZKR.L2}	85,519
R_{ZKR.L3}	86,732

Příklad výpočtu:

$$Z = R \quad (6.11)$$

$$R_{ZKR.L2} = R_p + p^2 \cdot Z_2 = R_1 + \frac{1}{89} \cdot R_2 \quad (6.12)$$

$$R_{ZKR.L2} = 52,35 \cdot 10^{-3} + \frac{2,952}{89} = 85,519 \text{ m}\Omega \quad (6.13)$$

Naměřené a vypočítané hodnoty jsou porovnány v tab. 6.10.

Tab. 6.10: Tabulka porovnaných výsledků

	Změřeno R[mΩ]	Spočteno R[mΩ]
R_{ZKR.L1}	90,39	54,308
R_{ZKR.L2}	72,37	85,519
R_{ZKR.L3}	76,085	86,732

Při porovnání naměřených a spočítaných hodnot odporu vinutí se v jednotlivých vinutí liší odpor pouze řádově, v desetinách mΩ. To je pro navrhovaný transformátor vyhovující.

6.3 Návrh vzduchové mezery

Vstupní parametry transformátoru jsou: primární počet závitů = 14, přenášený výkon $P_{IN} = 100 \text{ W}$, pracovní frekvence $f_{SW} = 70 \text{ kHz}$.

Akumulovaná energie, která se uloží do vzduchové mezery

$$E_{ACC} = \frac{P_{IN}}{f_{SW}} = \frac{100}{70 \cdot 10^3} = 1,43 \text{ mJ} \quad (6.14)$$

Převod transformátoru je 1:9, takže pokud bude přivedeno napětí 12 V na primární vinutí, na sekundárním vinutí bude $U_{OUT} = U_{IN} \cdot p = 12 \cdot 9 = \pm 110 \text{ V}$. Toto nastane, bude-li střída sepnutí rovna jedné sekundě.

Je-li známo výstupní napětí a převod transformátoru, lze vypočítat dobu sepnutí

$$T_{ON} = \frac{1}{2 \cdot f_{SW}} = \frac{1}{2 \cdot 70 \cdot 10^3} = 7,14 \text{ } \mu\text{s} \quad (6.15)$$

Je potřeba si uvědomit, že feritová jádra jsou velmi výkonná za vysokých teplot a při minimálních ztrátách. Z hysterézní smyčky vyplývá, že u feritových materiálů se pohybují ztráty v jádře kolem 0,35 T. Bylo zvoleno $B = 0,2 \text{ T}$. Ve feritovém jádře se nenakumuluje téměř žádná energie, tudíž toto lze zanedbat a počítat s tím, že všechna nakumulovaná energie bude ve vzduchovém jádře.

$$e = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,2^2}{4 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^{-7}} = 15\,900 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \quad (6.16)$$

Délku vzduchové mezery lze chápat jako objem V_{VZ} .

$$V_{VZ} = \frac{E_{ACC}}{e} = \frac{1,43 \cdot 10^{-3}}{15\,900} = 90 \text{ mm}^3 \quad (6.17)$$

Jádro má rozměry sloupku $10 \times 10 \text{ mm}$

$$e = \frac{V_{VZ}}{S} = \frac{90 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10} = 0,9 \text{ mm} \quad (6.18)$$

U tohoto transformátoru je vzduchová mezera 1 mm. To způsobí, že se do ní nakumuluje více energie nebo může nepatrně klesnout jeden parametr např. frekvence.

Indukované napětí

$$u_i = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N \cdot \frac{dB \cdot S}{dt} = N \cdot S \cdot \frac{B}{T_{ON}} \quad (6.19)$$

$$u_i = 14 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,2}{7,14 \cdot 10^{-6}} = 39,2 \text{ V} \quad (6.20)$$

Vypočítaná hodnota indukovaného napětí je příliš vysoká. Indukované napětí by mělo odpovídat svorkovému napětí, tudíž by mělo být v rozmezí 10 V až 40 V. To způsobí, že při svorkovém napětí 12 V a 14 závitů na primárním vinutí transformátoru, nedosáhne hodnota magnetické indukce 0,2 T. Tato hodnota bude pouhých 0,06 T.

$$B = \frac{u_{iNAST}}{u_{iSPOČ}} \cdot B_{MAX} = \frac{12}{39,2} \cdot 0,2 = 0,06 \text{ T} \quad (6.21)$$

Přenesený výkon

$$B = \left(\frac{u_{iNASTAV}}{u_{iSPOČ}} \right)^2 = \left(\frac{12}{39,2} \right)^2 = 0,1 \approx 10 \text{ W} \quad (6.22)$$

Zmenší-li se frekvence dvojnásobně, prodlouží se perioda sepnutí. Tím se uloží 2krát méně energie, protože se ukládá z 35 kHz (polovina pracovní frekvence). Jelikož amplituda bude 2krát větší a energie roste s druhou mocninou, bude ve skutečnosti uloženo 2krát více energie, a tím i 2krát vyšší výkon.

7 Měření na výkonovém spínaném zdroji

Jedná se o spínaný zdroj pracující v režimu Flyback. Řídicí obvod je složen z transformátoru, který má jedno vstupní a tři výstupní vinutí, operačního zesilovače TDA4605, stabilizátoru napětí a zpětné vazby. Dále je DPS osazena procesorem a zesilujícími operačními zesilovači.

7.1 Popis činnosti

Pomocné vinutí u transformátoru slouží k detekci proudu. Ve chvíli, kdy dosáhne magnetický tok v jádře hodnoty nula, obvod to díky pomocnému vinutí detekuje, následně vyhodnotí a celý cyklus kmitnutí je opakován. Hlavní výstupy sekundárního vinutí jsou galvanicky odděleny od zbytku obvodu a komunikují po SPI lince. Rezistory R6 a R10 mají snímací funkci. Je-li na nich napětí, zesílí se přes operační zesilovače a díky tomu ho může operační zesilovač TDA4605 vyhodnotit. Tento obvod na výstupu generuje napětí vhodné pro piezočleny a je podřízen procesoru ATTINY26SO20, který ovlivňuje výstupní napětí a referenci obvodu. Pokud tento procesor nebude do obvodu osazen, zdroj bude fungovat i nadále díky napět'ovému děliči složeném z rezistorů R23, R24, R30.

Vnitřní napětí procesoru je $U = 0,47 \text{ V}$. Toto napětí je očekáváno proti svorce 3. Ze schématu lze vyčíst hodnoty rezistorů napět'ového děliče a vypočítat výstupní napětí $U = R \cdot U_{\text{VNITŘNÍ}} = 300 \cdot 0,47 = 141 \text{ V}$. Zároveň obvod TDA4605 pracuje jako zpětná vazba. Procesor slouží k tomu, aby informoval o proudech a napětí, které v obvodu vznikají a předával je nadřazenému systému. Jelikož nemá žádný převodník, napětí je poskládáno na hodnotu 0,47 V. Pokud je nastavena na rezistoru R34 hodnota napětí např. na 0,2 V, k dosažení vnitřního napětí je potřeba už pouze 0,27 V. Tím se zmenší i výstupní napětí. Na tuto teorii není žádný přesně definovaný převod. Proto by byl lepší v obvodu zásobník, na kterém by bylo pevně nastavena napětí 0,2 V a k této hodnotě by se přidávalo zbylé napětí 0,27 V. Protože tuto funkci obvod nemá, je zavedena zpětná vazba, která nastaví zmíněné napětí 0,2 V za předpokladu, že zdroj pracuje ve vhodných podmínkách, tzn. není ve zkratu a není přetížen. Na procesoru může být nastaveno 0 až 5 V.

Operační zesilovače slouží k měření napětí a proudu. Dané napětí na výstupu sekundárního vinutí je zesilováno ze zanedbatelné hodnoty na hodnotu, která je

měřitelná a má význam pro procesor. Nebo výstupní napětí není zesilováno, ale pouze invertováno ze záporného napětí na kladné. Protože procesor pracuje s hodnotami 0 až 5 V, záporné hodnoty napětí by byly nezajímavé. Stabilizátor napětí U2 (7815/TO) propouští do obvodu pouze napětí 15 V, a tím chrání obvod před přetížením a následným zničením.

7.2 Oživení obvodu

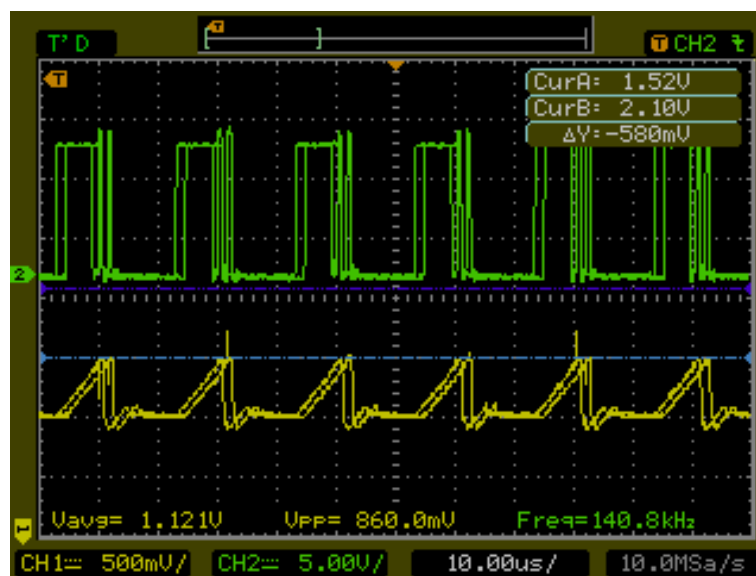
Celý obvod by měl „nastartovat“ přivedením napětí 12 V. Na výstupu sekundárního vinutí L1 vznikalo nedostatečné signálové napětí. Tato drobná závada byla odstraněna výměnou rezistoru R21 (10kΩ) za paralelní kombinaci rezistorů s hodnotami 150 Ω a 2,5 kΩ, tedy hodnotou 141 Ω.

$$R = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} = \frac{150 \cdot 2500}{150 + 2500} = 141 \Omega \quad (7.1)$$

Tento nedostatek by také mohl být vyřešen přivinutím např. třech závitů na sekundární vinutí L1, což v danou chvíli nebylo možné (obr. 6.2).

Transformátor není přesycován a obvod simuluje proud za předpokladu, že indukčnost je stále stejná. Hodnota indukčnosti by měla odpovídat hodnotě RC článku, který se dá parametrově nastavit. Obvod snímá napětí, ve kterém se přenáší i proud s informací 1 V. Překročí-li informace hodnotu 1 V, obvod se vypne.

Hodnota rezistoru R27 byla 4×zvětšena z 12 kΩ na 47 kΩ. Na pinu 2 obvodu TDA4605, který simuluje primární proud, byla změřena spínací doba (obr. 7.1).



Obr. 7.1: Doba sepnutí obvodu

7.3 Návrh RC článku

RC článek zajišťuje v obvodu simulaci primárního proudu, který je nutné vhodně limitovat.

$$u_i = L \frac{dI}{dt} \Rightarrow I = \frac{\Delta T \cdot U}{L} \Rightarrow \Delta T = \frac{I \cdot L}{U} \quad (7.2)$$

$$\Delta T = \frac{I \cdot L}{U} = \frac{2 \cdot 50,4 \cdot 10^{-6}}{12} = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (7.3)$$

$$\Delta U = \frac{U}{R \cdot C} \cdot \Delta T \Rightarrow R = \frac{U \cdot \Delta T}{\Delta U \cdot C} = \frac{12 \cdot 8,4 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 4,7 \cdot 10^{-9}} = 21,5 \text{ k}\Omega \quad (7.4)$$

$$u_i = L \frac{dI}{dt} \Rightarrow N \frac{B \cdot S}{dt} \quad (7.5)$$

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (7.6)$$

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l_{VZD}} \quad (7.7)$$

$$\frac{N \cdot \frac{N \cdot \mu_0 \cdot \Delta I}{l_{VZD}}}{dt} = L \cdot \frac{\Delta I}{dt} \quad (7.8)$$

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{l_{VZD}} = \frac{4\pi \cdot 1 \cdot 10^{-7} \cdot 14^2 \cdot 0,0001}{0,001} = 24,6 \text{ }\mu\text{H} \quad (7.9)$$

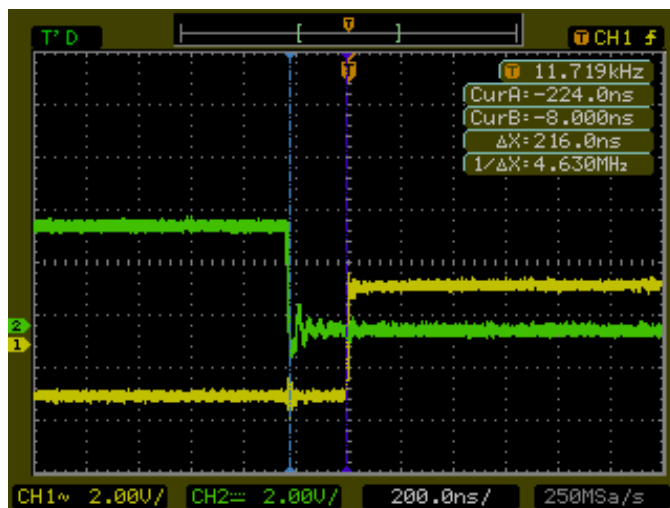
8 Měření na budiči

Budič je dimenzován na napětí 600 V a výkonové tranzistory na napětí 400 V. Je složen ze čtyř totožných půlmůstků. Logický programovatelný obvod Lattice slouží jako hradlové pole a dělí signál vycházející z oscilátoru Y1 nebo signál, který bude přiváděn z externího oscilátoru.

8.1 Dead time

V přílohách F a H jsou podrobná schémata půlmůstků. Tranzistory Q1, Q2 (jeden půlmůstek) jsou spínány současně. Vždy při sepnutí tranzistoru Q1 je rozepnut tranzistor Q2 a opačně. Při vyšším napětí by tranzistory představovaly zkrat. Tím by mohly zničit IR2112. Tomu je nutné zabránit. Proto se vkládá mezi vývody HIN a LIN IR2112 tzv. dead time. Tento čas zajistí, že tranzistory budou spínány v různých časových okamžicích. Projevem tohoto zadávaného dead timu je i efekt, kdy na buzeném půlmůstku, při nízkých frekvencích postřehnutelných lidským okem, na malou chvíli zhasnou diody D19, D20. Při vyšších frekvencích se již zdá, že diody pouze blikají.

Nejprve byl nastaven dead time na hodnotu 50 ns. Tento čas byl uspokojivý pro malá napětí, avšak při vyšších napětí se průběhy opět blížily potenciálnímu zkratu. Proto byl zvolen dead time 216 ns, což je pro tento obvod dostatečné (obr. 8.1).



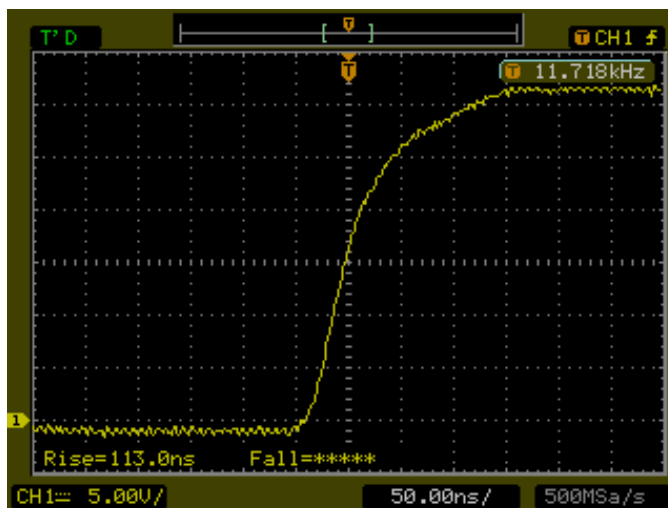
Obr. 8.1: Dead time nastaven na 216 ns

8.2 Měření náběžných a sestupných hran

Toto měření má za úkol zjistit, jak dlouhé jsou náběžné a sestupné hrany spínacích tranzistorů IRF840. Obě hrany byly změřeny v rozsahu 10-90 % své náběžné či sestupné části. Frekvence pulzů byla nastavena na 11,7 kHz. Jako simulace kapacity byly mezi svorky J21 a J24 připojeny kondenzátory o různých kapacitách (tab. 8.1). Odzkoušeny byly všechny půlmůstky, konkrétní měření bylo provedeno na prvním půlmůstku s označením výkonových tranzistorů Q1, Q2. Napájecí napětí bylo nastaveno na 10 V a proud na 0,85 A připojené na svorky J22 (příloha L). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 8.1 a výsledky z měření prezentují obr. 8.2 až obr. 8.11.

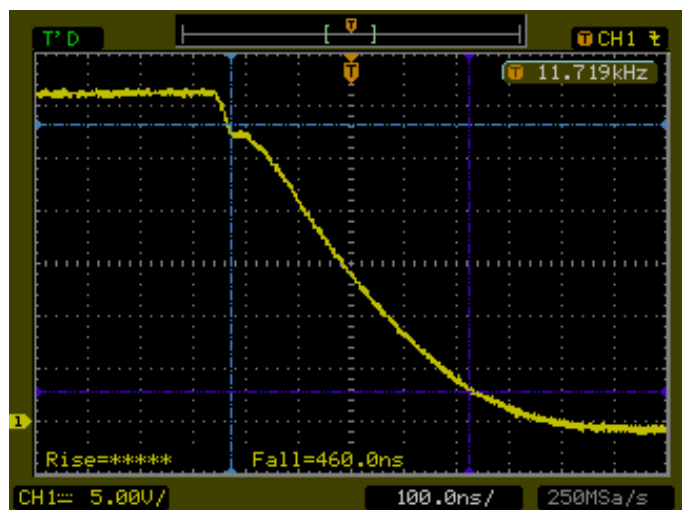
Tab. 8.1: Doby náběžných a sestupných hran¹

f = 11,7 kHz		
Kapacita [nF]	t_{nh} [ns]	t_{sh} [ns]
1,00	113	108
4,70	94,2	109
47,0	338	460
10,0	113	122
100	456	574

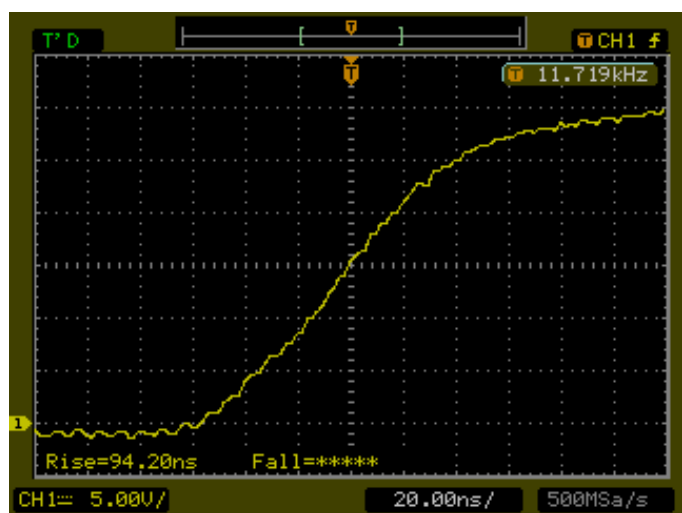


Obr. 8.2: Náběžná hrana s kapacitou kondenzátoru 1 nF

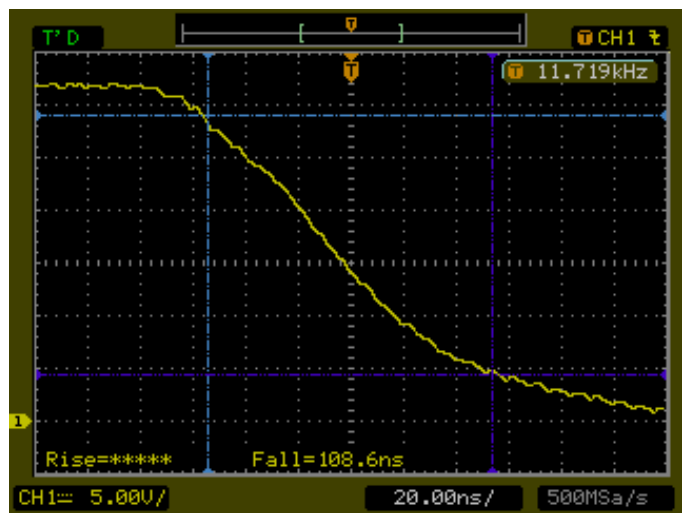
¹ t_{nh} – doba náběžné hrany, t_{sh} – doba sestupné hrany



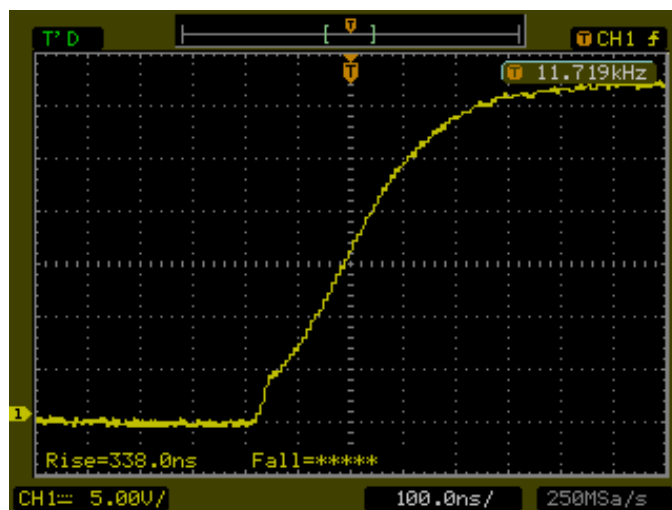
Obr. 8.3: Sestupná hrana s kapacitou kondenzátoru 1 nF



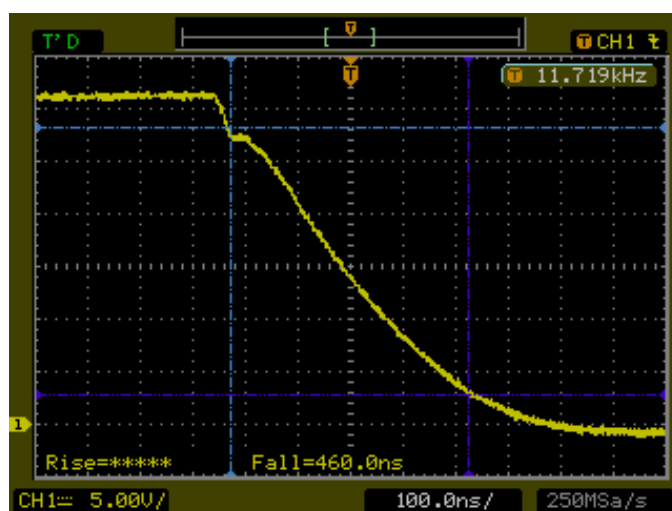
Obr. 8.4: Náběžná hrana s kapacitou kondenzátoru 4,7 nF



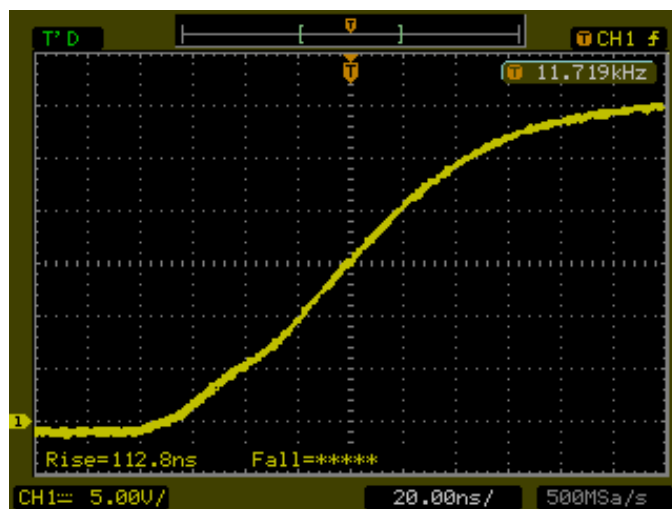
Obr. 8.5: Sestupná hrana s kapacitou kondenzátoru 4,7 nF



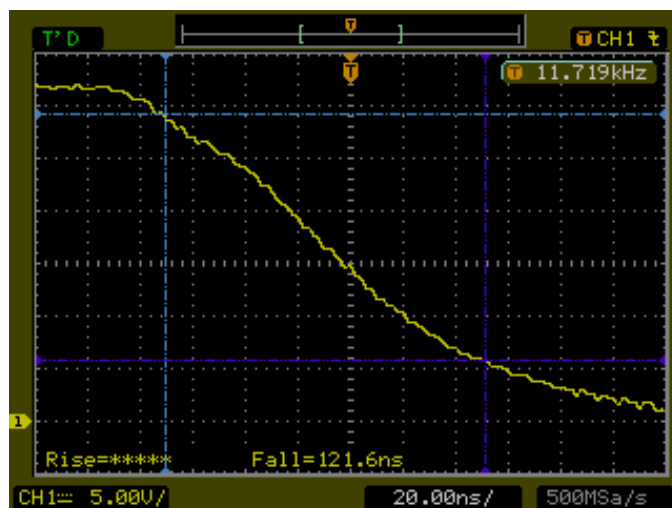
Obr. 8.6: Náběžná hrana s kapacitou kondenzátoru 47 nF



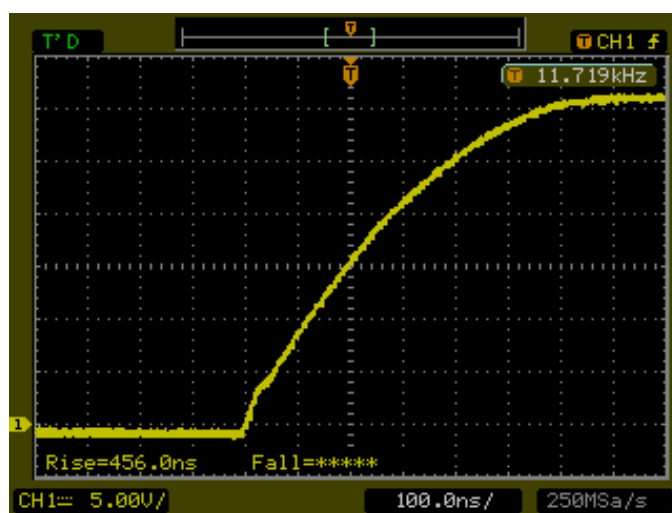
Obr. 8.7: Sestupná hrana s kapacitou kondenzátoru 47 nF



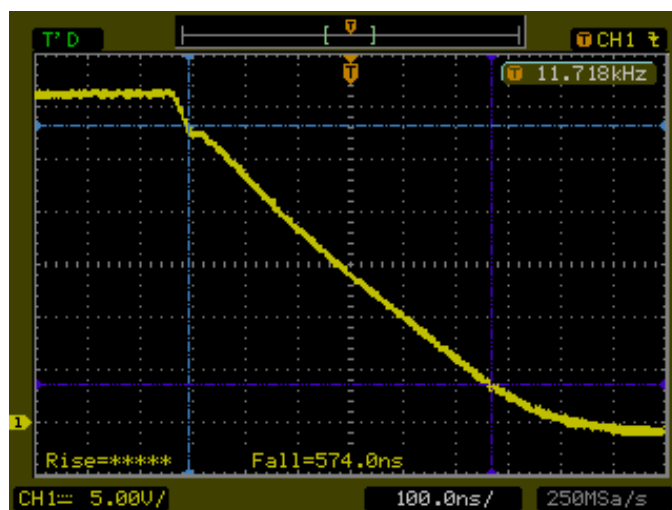
Obr. 8.8: Náběžná hrana s kapacitou kondenzátoru 10 nF



Obr. 8.9: Sestupná hrana s kapacitou kondenzátoru 10 nF



Obr. 8.10: Náběžná hrana s kapacitou kondenzátoru 100 nF

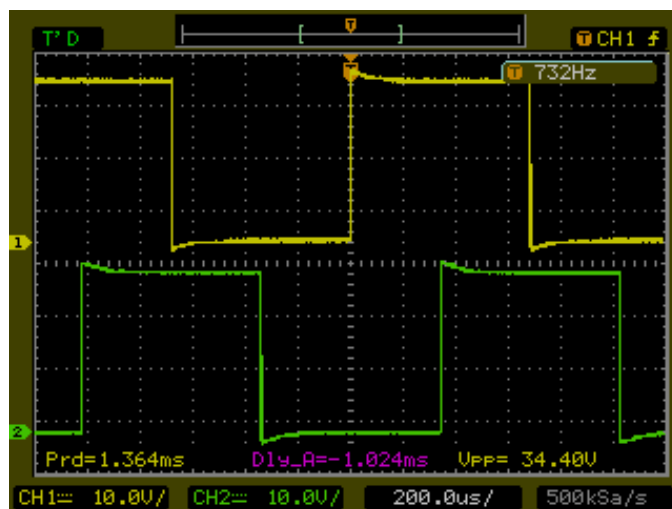


Obr. 8.11: Sestupná hrana s kapacitou kondenzátoru 100 nF

8.3 Měření fázových posuvů

Celé měření je zaměřeno na zjištění fázových posuvů jednotlivých pólů pro různé frekvence. Jak již bylo řečeno dříve, fázové posuvy realizuje hradlové pole Lattice, které je v tomto případě naprogramované tak, aby posouvalo fáze o $\pi/2$.

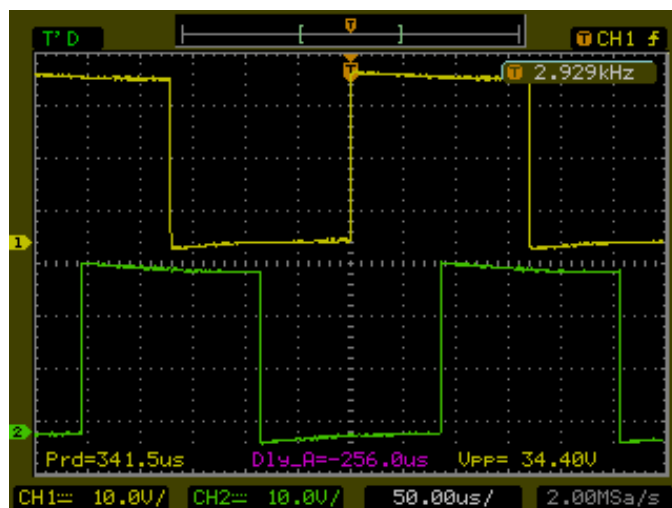
Stejně jako v předchozím měření bylo napájecí napětí nastaveno na velikost 10 V a proud na 0,85 mA a bylo přivedeno na svorky J22. Na svorkách J20 bylo napětí 34 V. V počítači bylo hradlové pole vždy přeprogramováno na jinou frekvenci a program byl nahrán zpět. Frekvence byla měněna po jedné čtvrtině od hodnoty 700 Hz do hodnoty 590 kHz. Budič byl měřen i na nižších frekvencích, ale pracuje až od frekvence 700 Hz. Už i na této frekvenci jsou vidět zákmity při přechodu úrovně signálu. Výsledky představují obr. 8.12 až obr. 8.18.



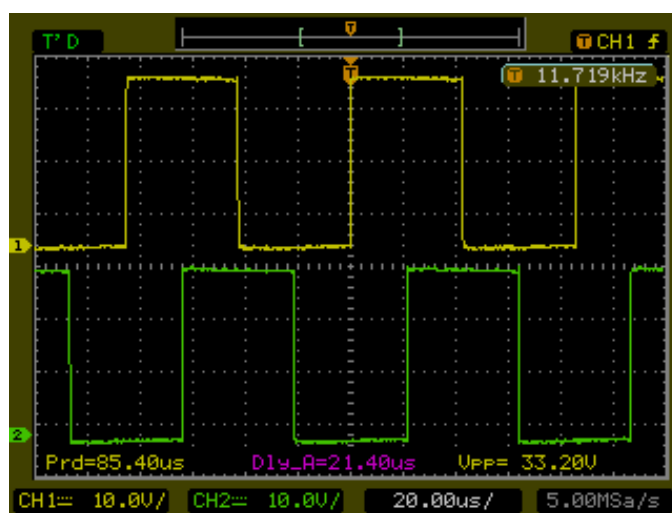
Obr. 8.12: Fázový posuv při frekvenci 1 kHz²

² vpravo nahoře je hodnota frekvence

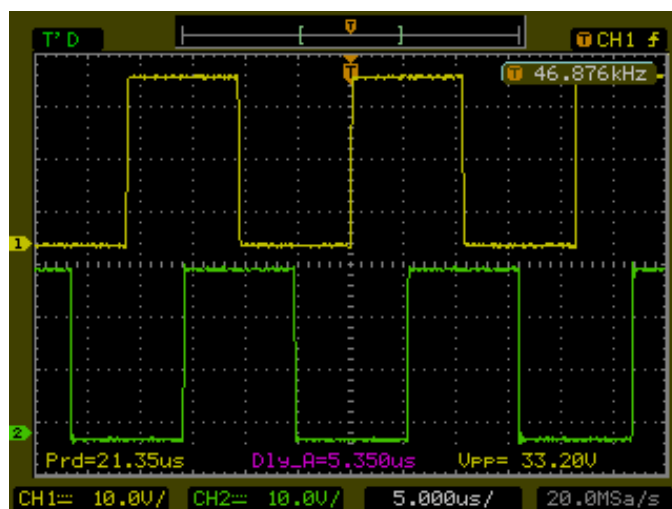
Prd – perioda, Dly_A – hodnota fázového posuvu mezi kanály, V_{pp} – napětí (špička – špička)



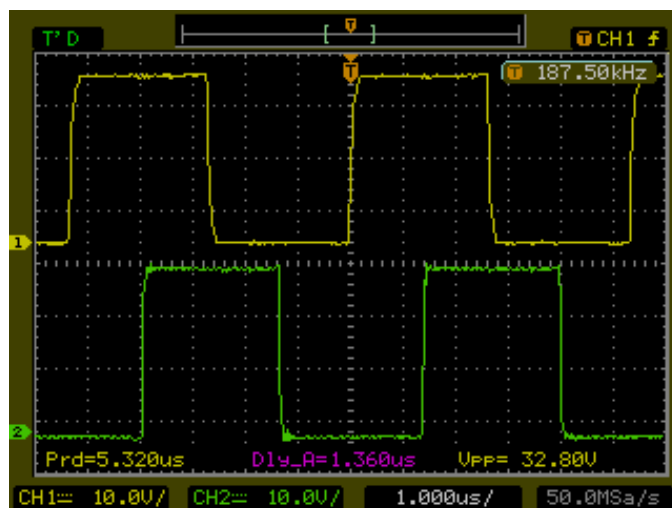
Obr. 8.13: Fázový posuv při frekvenci 3 kHz



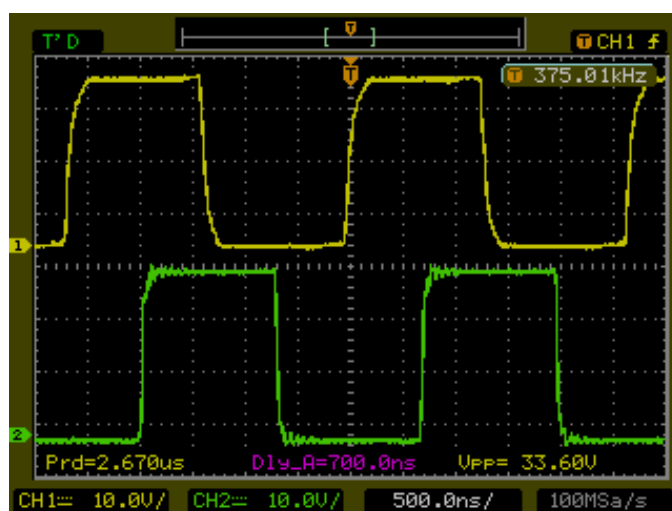
Obr. 8.14: Fázový posuv při frekvenci 11 kHz



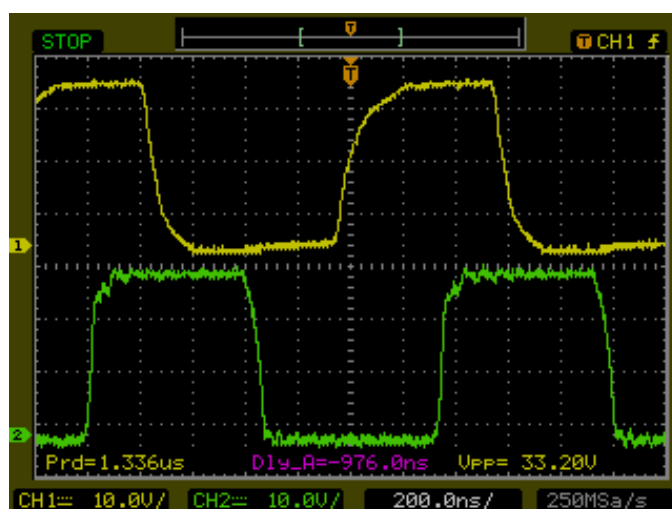
Obr. 8.15: Fázový posuv při frekvenci 47 kHz



Obr. 8.16: Fázový posuv při frekvenci 187 kHz



Obr. 8.17: Fázový posuv při frekvenci 375 kHz



Obr. 8.18: Fázový posuv při frekvenci 590 kHz

Závěr

Předmětem této bakalářské práce byla realizace DC/DC zdroje a budiče pro piezomotory.

Při provedení DC/DC zdroje musel být navinut transformátor s předem uvedenými parametry. Hodnoty rozptylových indukčností na primárním a pomocném sekundárním vinutí byly řádově v desítkách μH a hlavní pomocná vinutí řádově v desítkách mH , čímž byl splněn zadaný požadavek. Z naměřených hodnot výstupního napětí je patrné, že rozdíl napětí na hlavních výstupních vinutích je téměř nulový ($\Delta U = 0,4 \text{ V}$), což znamená, že byl transformátor dobře navinut. Odpory vinutí vycházely velmi podobně, kolem 3Ω .

Na budiči byly změřeny doby náběžných a sestupných hran a fázové posuvy. Na těchto posuvech vznikají při velmi nízkých kmitočtech záněje. Naopak při vysokých kmitočtech, kolem 200 kHz , dochází k výraznému zkreslení signálu, který začíná připomínat pilový průběh. Nejvíce je to patrné na signálu z obr. 8.18.

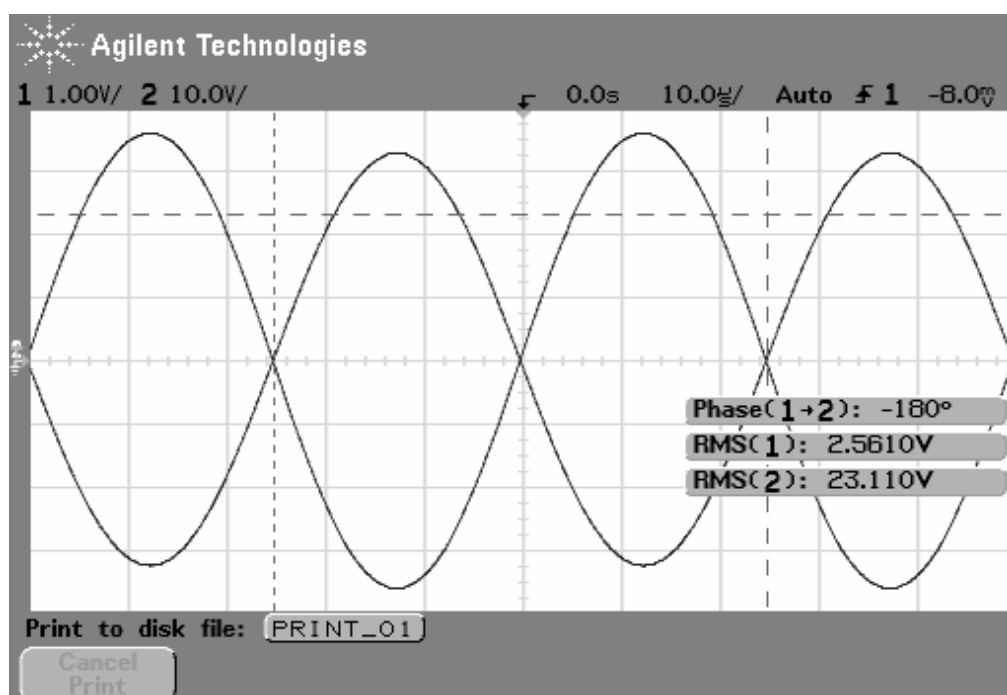
Bylo zjištěno, že pro buzení piezoelektrických motorků a jiných aktuátorů jsou vhodné průběhy kolem 100 kHz .

Literatura

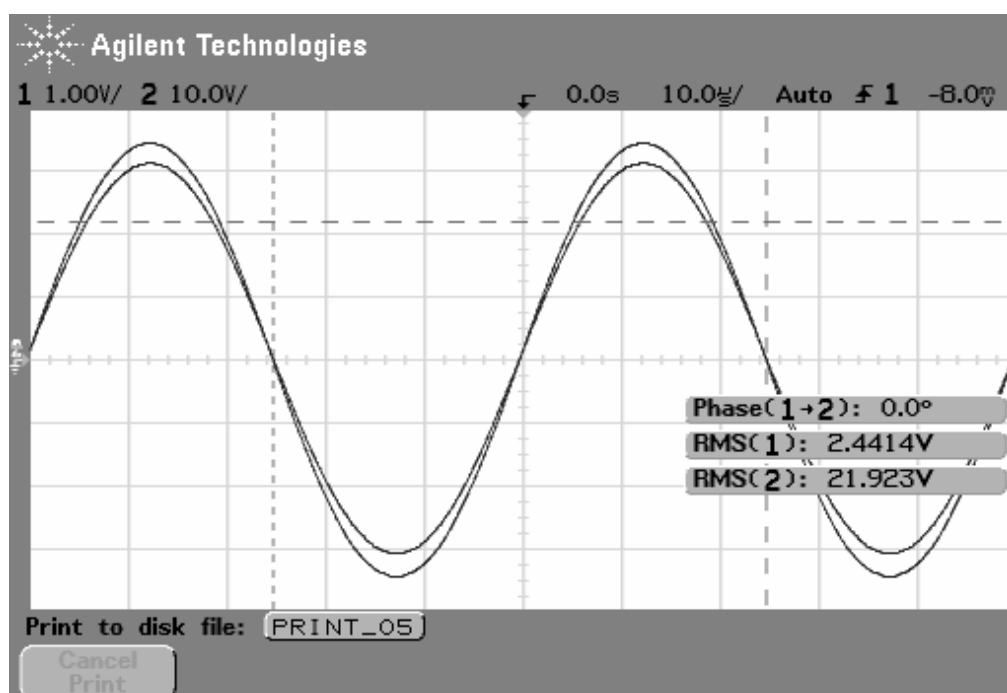
- [1] *Printed* [online]. 2008 [cit. 2009-02-13]. Dostupný z WWW:
<<http://printed.webove-aplikace.com/tpv-technologicka-cast-935>>.
- [2] MRÁZEK, Oldřich. *Printed* [online]. 1997 [cit. 2009-03-18]. Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/Firemni-clanky/Printed/ART7-Pokovovací-procesy-plosnych-spoju.html>>.
- [3] *ConVERTER* [online]. 2002 [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW:
<<http://www.converter.cz/fyzici/curie.htm>>.
- [4] *IP_piezo* [online]. 2009 [cit. 2009-04-09]. Dostupný z WWW:
<http://dce.felk.cvut.cz/ip/prednasky/IP_piezo.pdf>.
- [5] *Fyzmatik.pise* [online]. 2008 [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW:
<<http://fyzmatik.pise.cz/72609-piezoelektricky-jev.html>>.
- [6] RYDLO, Pavel, RICHTER, Aleš. *Piezoelektrické motory*. Automa. 2000, č. 9, str. 9 - 12.
- [7] *Wikipedia* [online]. 2009 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Transformátor>>.
- [8] RYDLO, Pavel. *Řízení elektrických střídavých pohonů*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007. 126 s. ISBN 978-80-7372-223-4.
- [9] BELZA, Jaroslav. *Belza* [online]. 2009 [cit. 2009-04-27]. Dostupný z WWW:
<<http://www.belza.cz/swmodeps/compow1.htm>>.
- [10] BABČANÍK, Jan. *Hw.cz* [online]. 2009 [cit. 2009-04-27]. Dostupný z WWW:
<<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/ART1876-Spinane-zdroje.html>>.
- [11] *Fel* [online]. 2009 [cit. 2009-04-27]. Dostupný z WWW:
<http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/enz/Texty_folie/Texty/Konf_sit_imp_zdroju.pdf>.
- [12] RYDLO, Pavel, KOLÁŘ, Milan. *Řídicí obvod piezoelektrického motorku*. Elektrické pohony a výkonová elektronika. Konference. Brno, 2002.

- [13] *Semach - výroba plošných spojů* [online]. 2008 [2009-04-05]. Dostupný z WWW: <www.plosnespoje.com/pdf/popis.pdf>.
- [14] *Fyzmatik.pise* [online]. 2008 [2009-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://fyzmatik.pise.cz/72609-piezoelektricky-jev.html>>.
- [15] *ConVERTER* [online]. 2002 [2009-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.converter.cz/fyzici/curie.htm>>.
- [16] REICHL, Jaroslav, VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [2009-04-08]. Dostupný z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=422>>.
- [17] UECHA, S., TOMIKAWA, Y. *Ultrasonic motors, theory and applications*. Oxford, Clarendon press, 1993.
- [18] *Edutorium* [online]. 2008 [2009-04-08]. Dostupný z WWW: <http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74726f73746174696b61h&key=28>.
- [19] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku VI. : od A do Z*. České Budějovice: KOPP, 2001. 287 s. ISBN 80-7232-146-3.

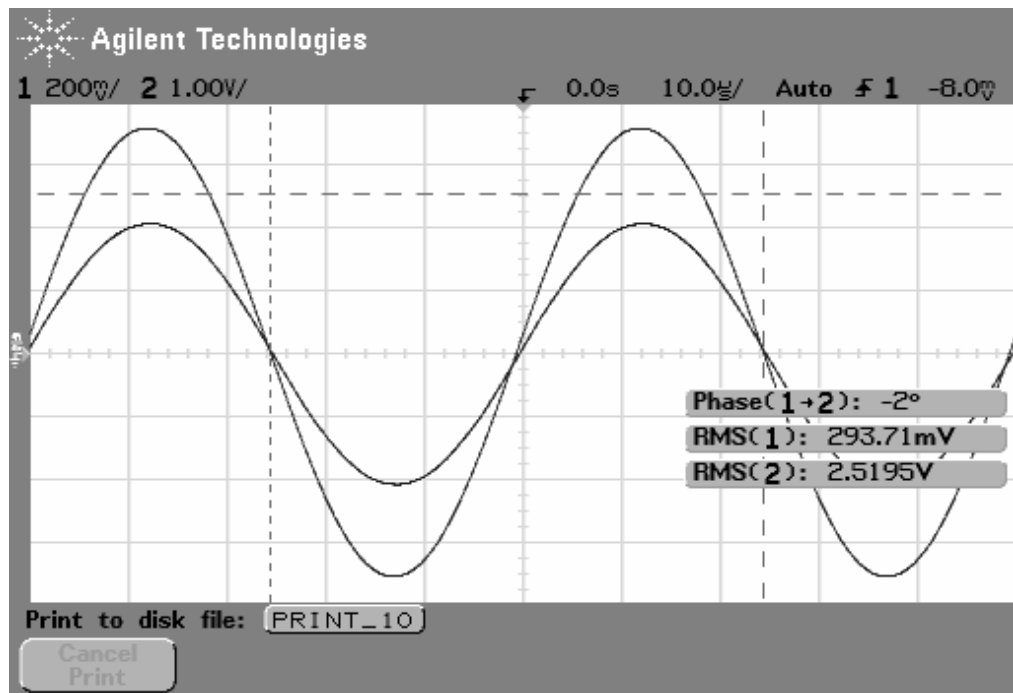
Příloha A: Osciloskopická měření



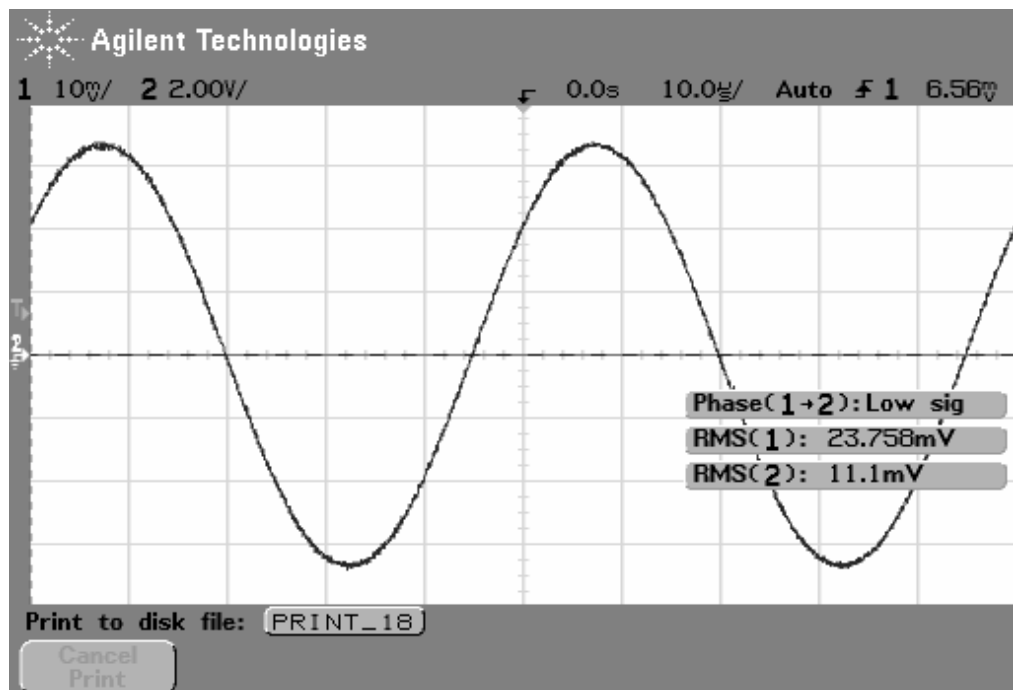
1)



2)

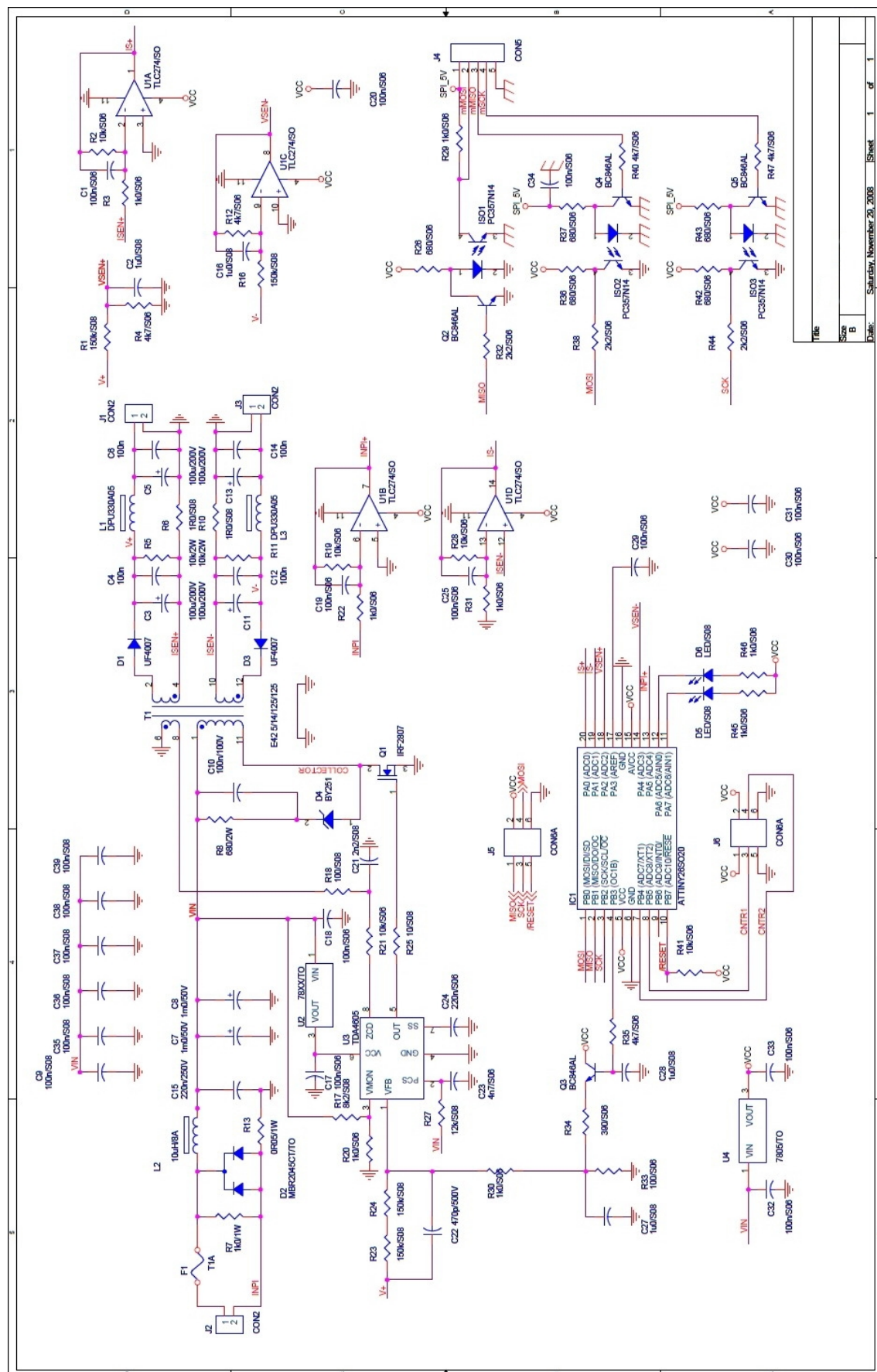


3)



4)

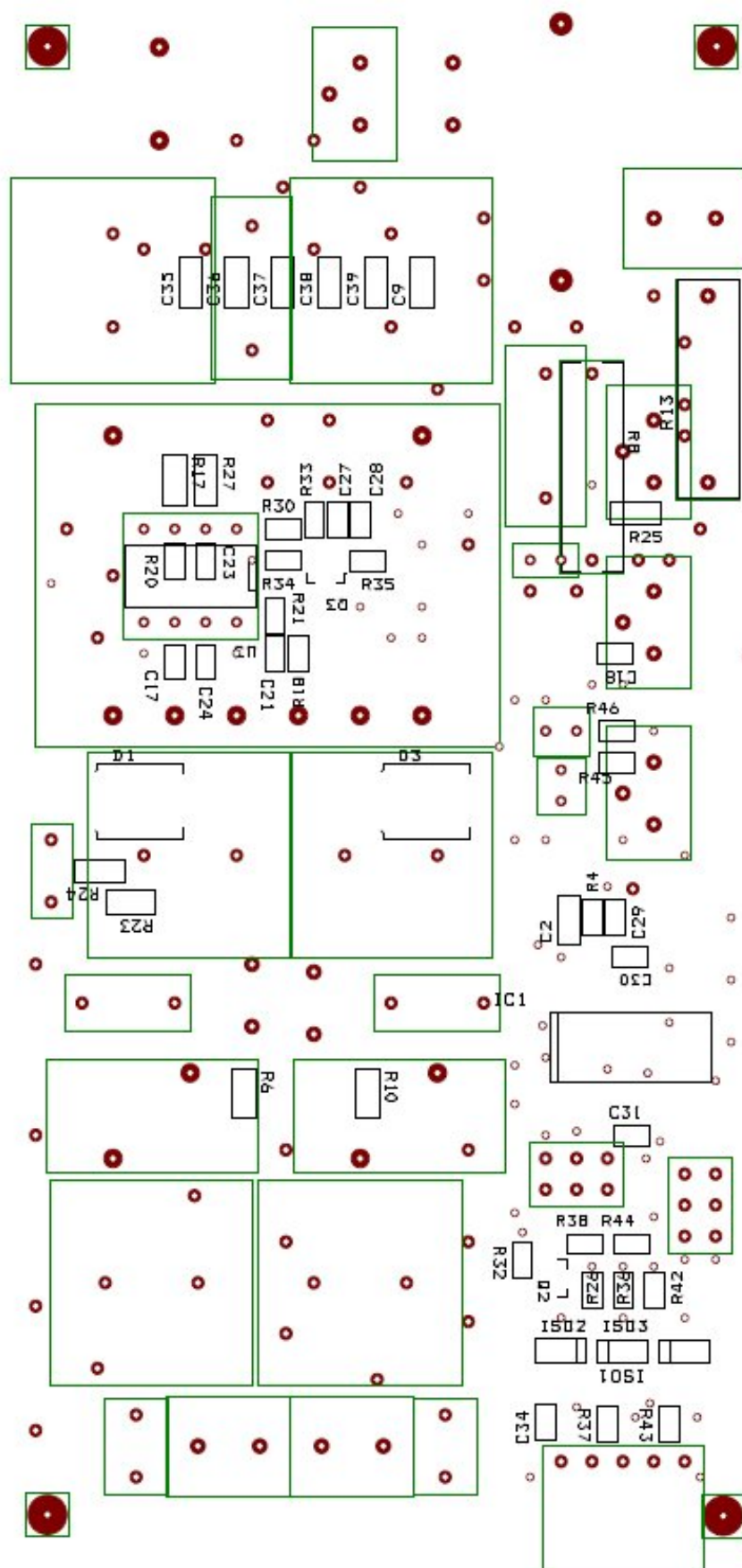
Příloha B: Schéma vysokofrekvenčního zdroje



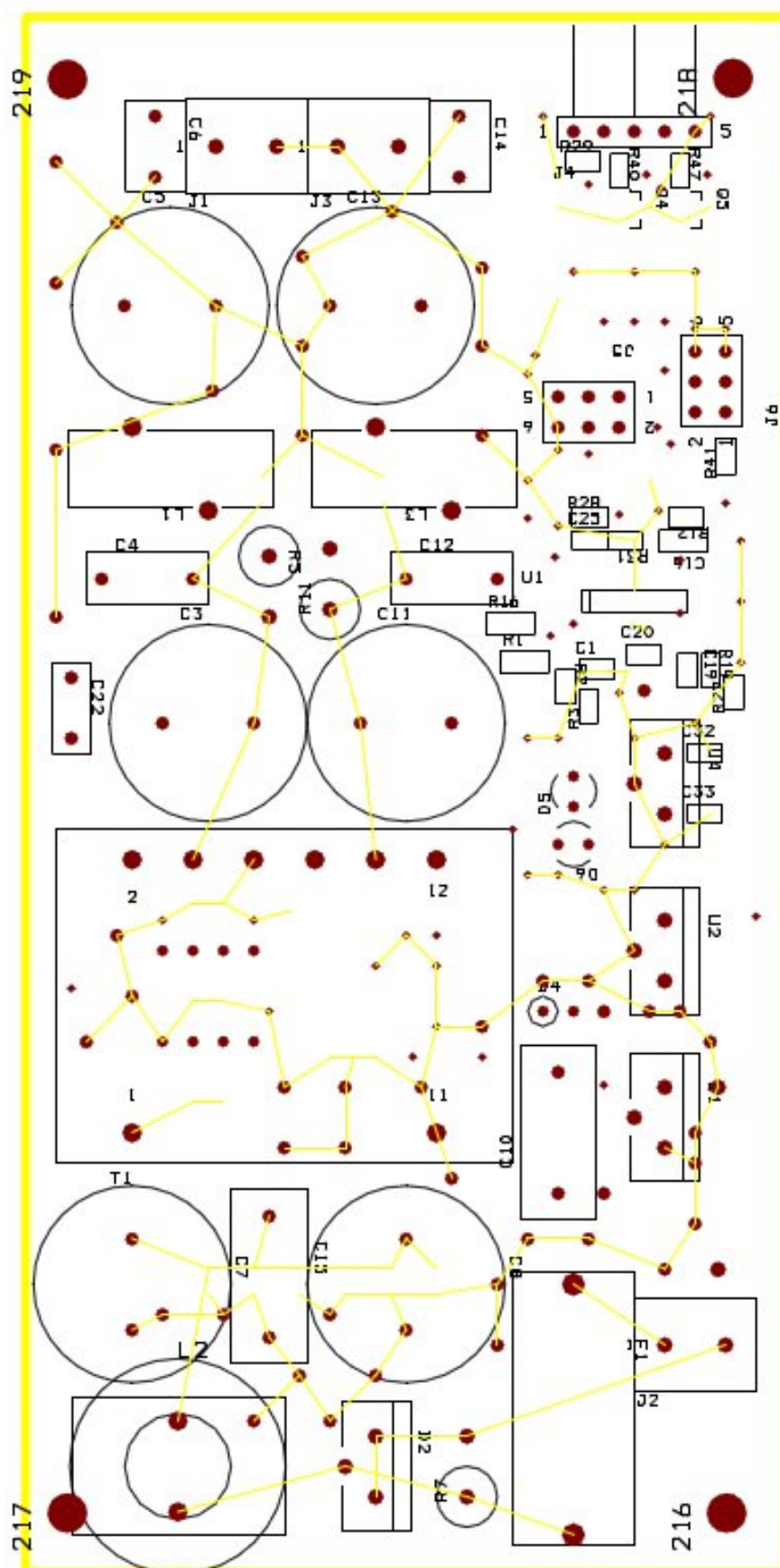
Příloha C: Seznam součástek pro výrobu DPS zdroje

Item	Quantity	Reference	Part
1	12	C1,C17,C18,C19,C20,C25, C29,C30,C31,C32,C33,C34	100n/S06
2	4	C2,C16,C27,C28	1u0/S08
3	4	C3,C5,C11,C13	100u/200V
4	4	C4,C6,C12,C14	100n/400V
5	2	C7,C8	1m0/50V
6	6	C9,C35,C36,C37,C38,C39	100n/S08
7	1	C10	33n/160V
8	1	C15	220n/250V
9	1	C21	2n2/S06
10	1	C22	470p/500V
11	1	C23	4n7/S06
12	1	C24	220n/S06
13	2	D1,D3	UF4007
14	1	D2	MBR20100CT/TO
15	1	D4	UF4007
16	2	D5,D6	LED/S08
17	1	F1	T1A
18	1	IC1	ATTINY26SO20
19	3	ISO1,ISO2,ISO3	PC357N14
20	3	J1,J2,J3	CON2
21	1	J4	CON5
22	2	J5,J6	CON6A
23	2	L1,L3	DPU330A05
24	1	L2	10uH/8A
25	1	Q1	P36
26	4	Q2,Q3,Q4,Q5	BC846AL
27	4	R1,R16,R23,R24	150k/S08
28	5	R2,R19,R21,R28,R41	10k/S06
29	8	R3,R20,R22,R29,R30,R31, R45,R46	1k0/S06
30	5	R4,R12,R35,R40,R47	4k7/S06
31	2	R5,R11	15k/1W
32	2	R6,R10	1R0/S08
33	1	R7	1k0/1W
34	1	R8	680/2W
35	1	R13	0R05/1W
36	1	R17	8k2/S08
37	1	R18	100/S06
38	1	R25	10/S08
39	5	R26,R36,R37,R42,R43	680/S06
40	1	R27	12k/S08
41	3	R32,R38,R44	2k2/S06
42	1	R33	100/S06
43	1	R34	390/S06
44	1	T1	E42 5/14/125/125
45	1	U1	TLC274/SO
46	1	U2	7815/TO
47	1	U3	TDA4605
48	1	U4	7805/TO

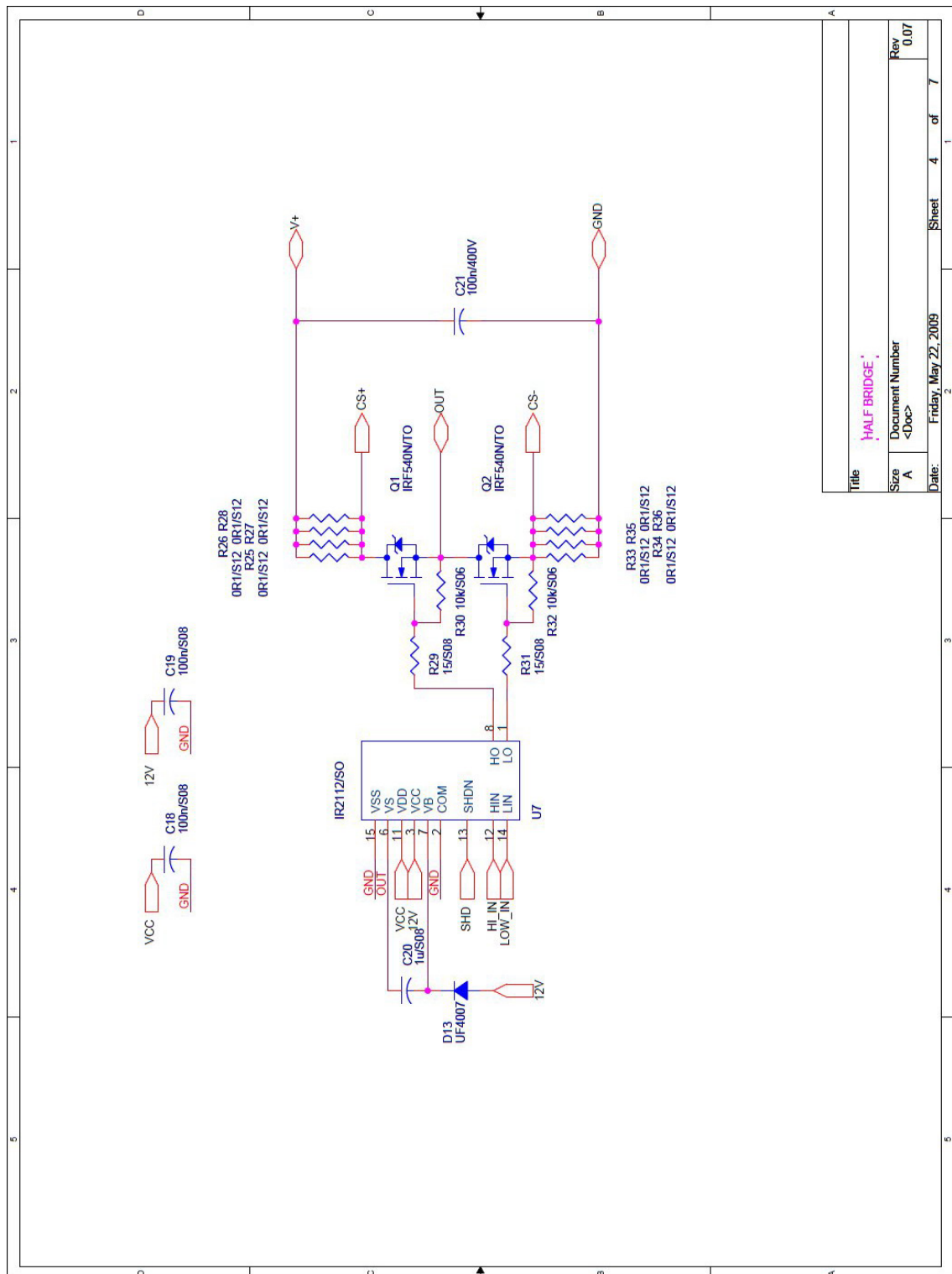
Příloha D: DPS zdroje bottom



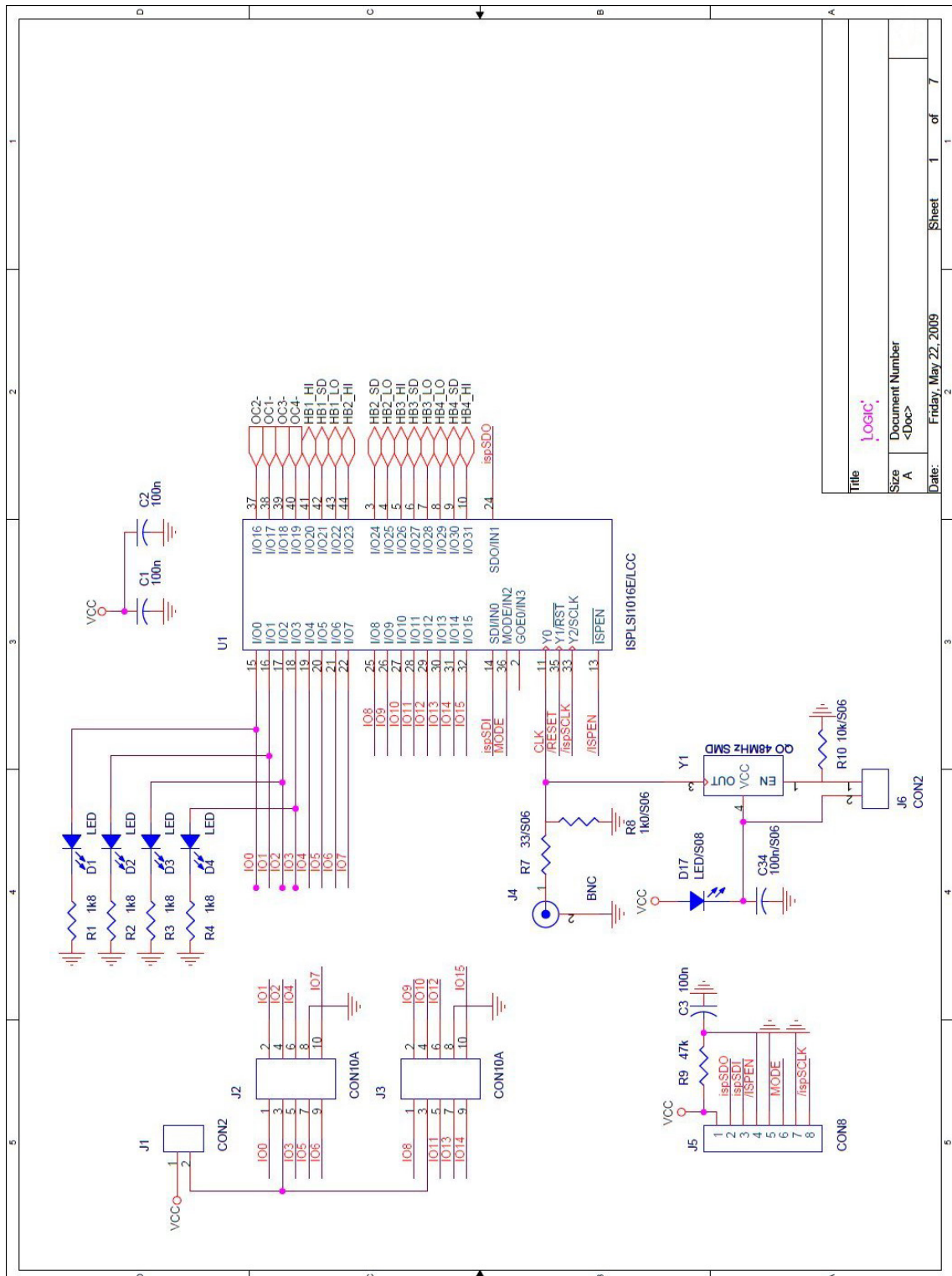
Příloha E: DPS zdroje top



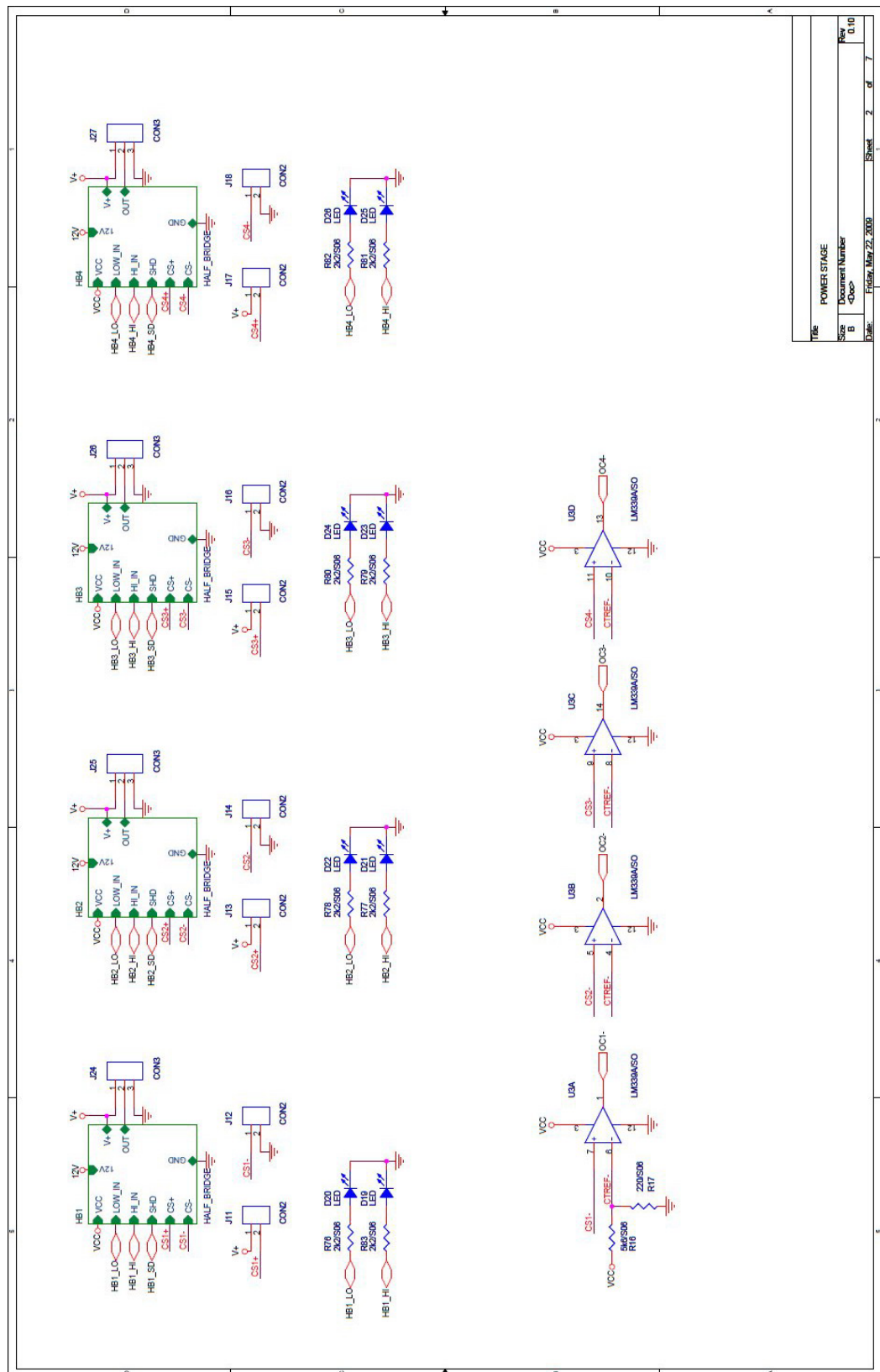
Příloha F: Schéma zapojení IO IR2112 v jednom půlmůstku budiče



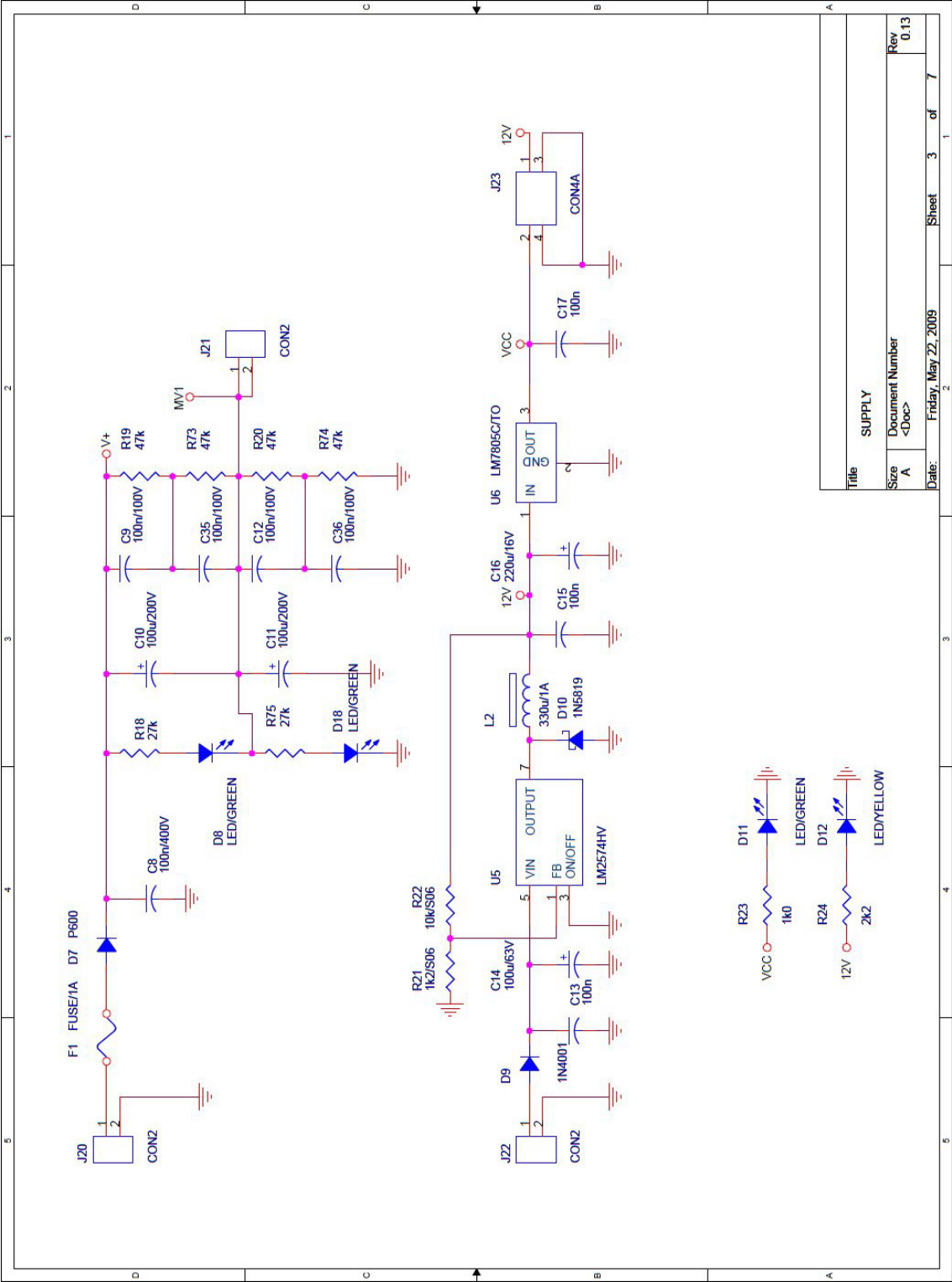
Příloha G: Schéma zapojení programovatelného hradlového pole Lattice v budiči



Příloha H: Schéma zapojení IO LM339A v budiči



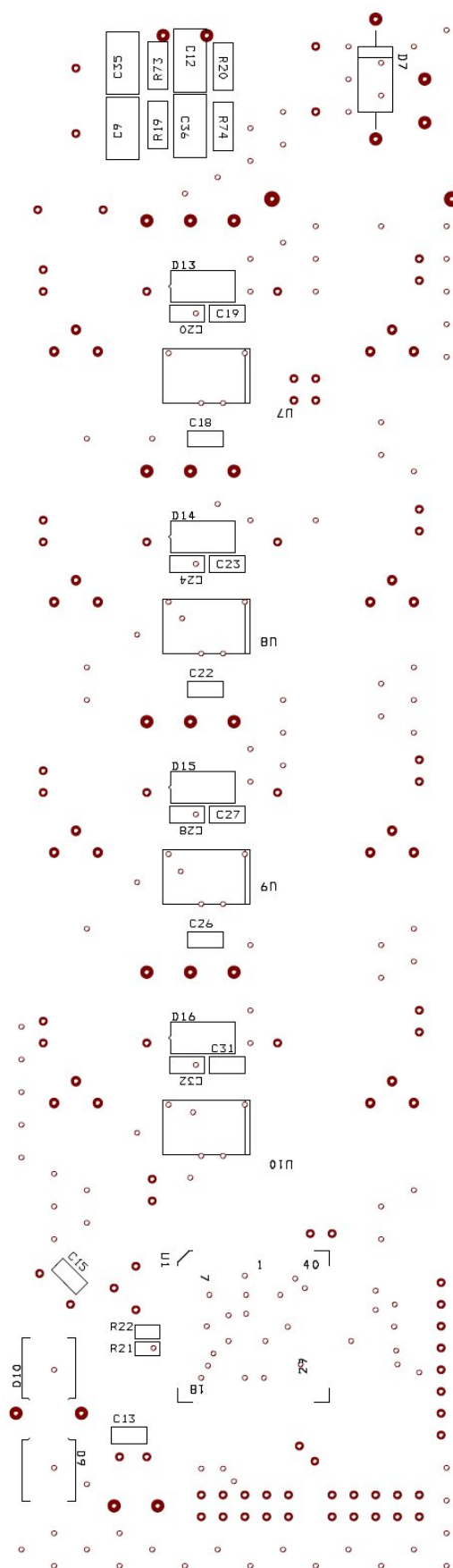
Příloha I: Schéma zdrojové části



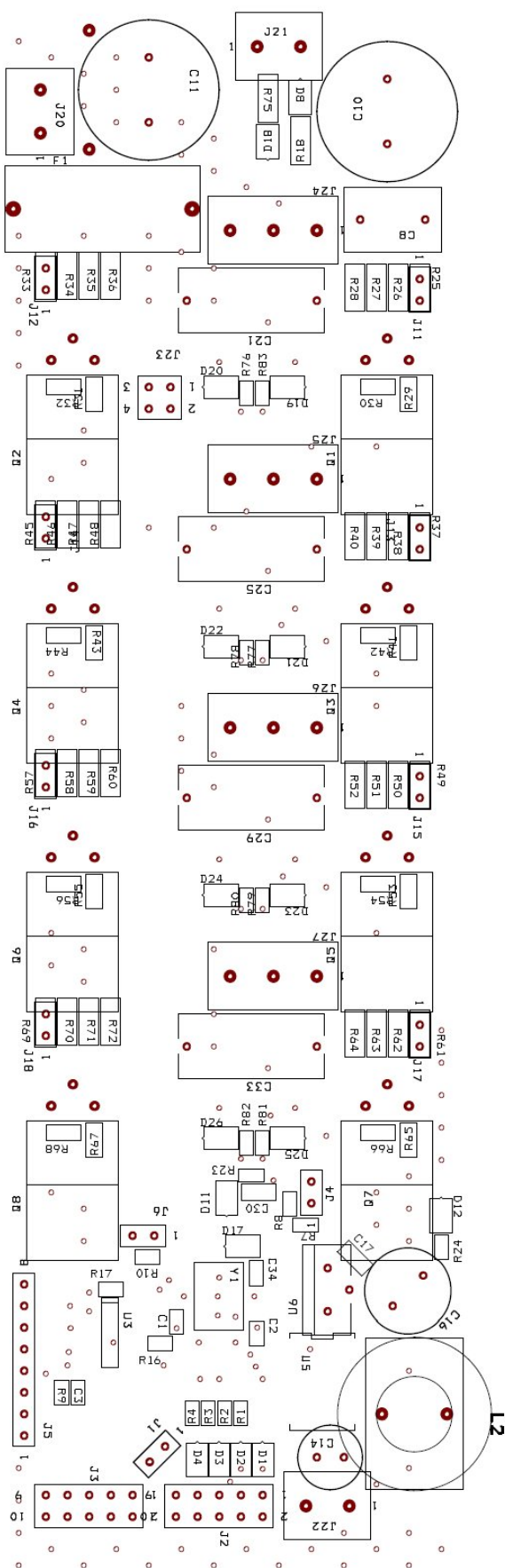
Příloha J: Seznam součástek pro výrobu DPS budiče

Item	Quantity	Reference	Part
1	6	C1,C2,C3,C13,C15,C17	100n/S06
2	5	C8,C21,C25,C29,C33	100n/400V
3	4	C9,C12,C35,C36	100n/100V
4	2	C10,C11	100u/250V
5	1	C14	100u/50V
6	1	C16	220u/25V
7	8	C18,C19,C22,C23,C26,C27,C30,C31	100n/S08
8	4	C20,C24,C28,C32	1u/S08
9	1	C34	100n/S06
10	12	D1,D2,D3,D4,D19,D20,D21, D22,D23,D24,D25,D26	LED
11	1	D7	P1000
12	3	D8,D11,D18	LED/GREEN
13	1	D9	FU4007
14	1	D10	SK54
15	1	D12	LED/YELLOW
16	4	D13,D14,D15,D16	UF4007
17	1	D17	LED/S08/ YELLOW
18	1	F1	FUSE/1A
19	13	J1,J6,J11,J12,J13,J14, J15,J16,J17,J18,J20,J21, J22	CON2
20	2	J2,J3	CON10A
21	1	J4	BNC
22	1	J5	CON8
23	1	J23	CON4A
24	4	J24,J25,J26,J27	CON3
25	1	L2	330u/1A
26	8	Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8	IRF840N/TO
27	4	R1,R2,R3,R4	1k8/S06
28	1	R7	33/S06
29	1	R8	1k0/S06
30	5	R9,R19,R20,R73,R74	47k/S06
31	10	R10,R22,R30,R32,R42,R44, R54,R56,R66,R68	10k/S06
32	1	R16	5k6/S06
33	1	R17	220/S06
34	2	R18,R75	27k
35	1	R21	1k2/S06
36	1	R23	1k0
37	1	R24	2k2
38	32	R25,R26,R27,R28,R33,R34,R35,R36,R37,R38,R39, R40,R45,R46, R47,R48,R49,R50,R51,R52,R57,R58, R59,R60,R61,R62,R63,R64,R69,R70, R71,R72	0R1/S12
39	8	R29,R31,R41,R43,R53,R55, R65,R67	15/S08
40	8	R76,R77,R78,R79,R80,R81, R82,R83	2k2/S06
41	1	U1	ISPLSI1016E/LCC
42	1	U3	LM339A/SO
43	1	U5	LM2574HV
44	1	U6	LM7805C/TO
45	4	U7,U8,U9,U10	IR2112/SO
46	1	Y1	QO 48MHz SMD

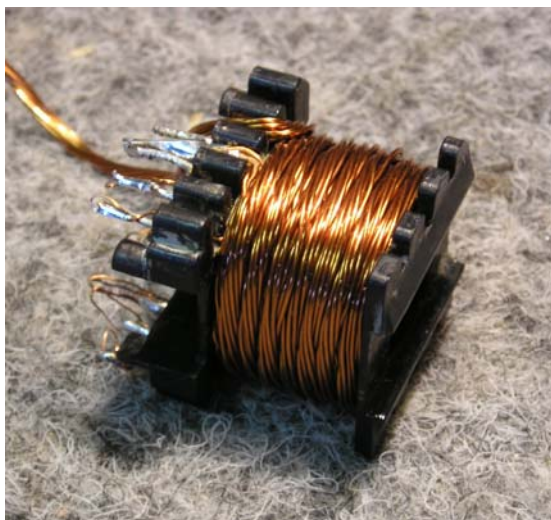
Příloha K: DPS budiče botttom



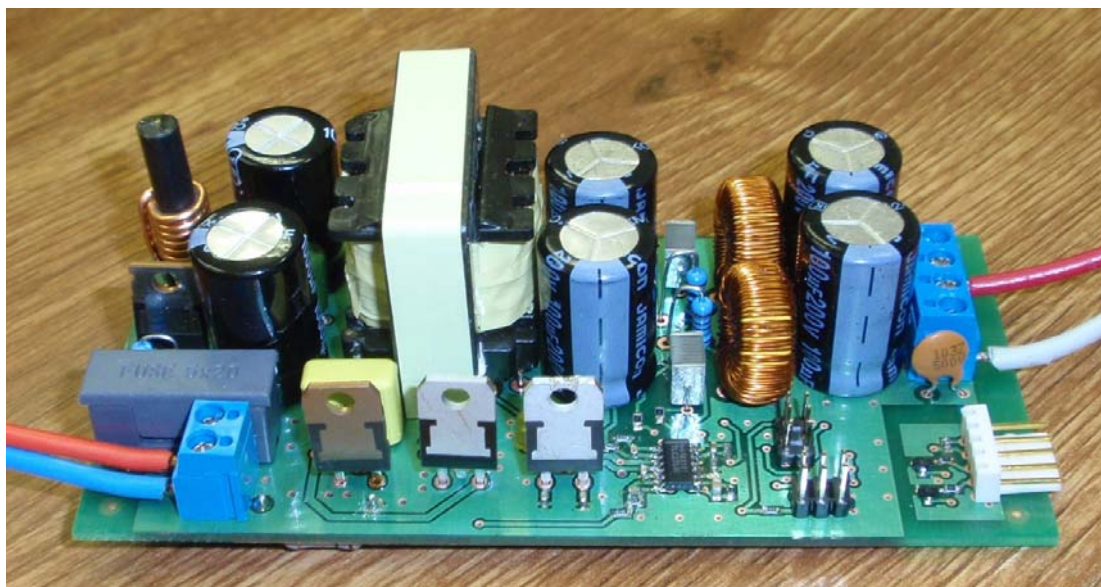
Příloha L: DPS budiče top



Příloha M: Zhotovený transformátor



Příloha N: Spínaný zdroj



Příloha O: Budicí obvod

